



**Universidad
de Alcalá**

**Programa de doctorado en Electrónica: Sistemas
Electrónicos Avanzados. Sistemas Inteligentes**

**“CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE
PARÁMETROS DE DISPOSITIVOS
FOTOVOLTAICOS. APLICACIÓN A LA
INDUSTRIA”**

**Tesis Doctoral presentada por
EDUARDO FORNIÉS GARCÍA**

Directora:

Dra. María del Carmen Alonso García

Director:

Dr. Fernando B. Naranjo Vega

Alcalá de Henares, 2014

A mi padre

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Carlos Zaldo todo lo que ha hecho por mí. Desde sus explicaciones de física cuando iba al instituto hasta su implicación directa en uno de los capítulos de esta tesis. Todo este trabajo ha sido realidad gracias a él.

A José María Albella y Olga Sánchez, por hacer posible el aprendizaje en todas las técnicas de caracterización y deposición y las investigaciones relacionadas con recubrimientos duros. Fue una pena no poder sacar una tesis de ese trabajo, pero me quedo con las publicaciones y la relación personal que aún mantengo con vosotros.

A la gente del ICMC (CSIC), Cristina, Javi, Nacho, Isabel y Ana. ¡¡A las viejas glorias!! Manuel, Caretti, Jangel, Iván (Magnificus), Ramón, Rafa. La verdad es que fueron muy buenos tiempos, ¡si no los mejores! Gracias Fátima por tu buena compañía y ayuda con el SEM.

Gracias a todos los compañeros de la industria con los que tanto he aprendido y sin los que esta tesis tampoco se hubiera podido realizar. A todos los de BP Solar, Pilar, Silicio Solar, IFV Ensol (gracias Javi y José por todo lo que os tocó sufrir con este proyecto), ILB Helios y Aurinka. Personalizo esta gratitud en Benja, con el que llevo trabajando desde el principio y espero que por mucho tiempo más.

No se me olvida que esta tesis comenzó a fraguarse frente a una copa en un irlandés de Almería. Gracias David, tenías razón, y evidentemente tu ayuda me ha servido de mucho. Agradezco también a Manuel Sánchez por hacerlo posible. Manuel Mazo, su implicación directa y completamente desinteresada en el proyecto, su apoyo y sus explicaciones han contribuido de una manera imprescindible a la consecución del mismo.

Quiero agradecerle a mis directores de tesis, M^a Carmen Alonso y Fernando Naranjo su confianza en mí, su ayuda y guía durante todo el trabajo de investigación y escritura de la tesis.

A la gente del CIEMAT. Jose Pedro, gracias porque siempre me has ayudado sin esperar nada a cambio. Joselo, siempre tan didáctico en tus explicaciones, te agradezco toda tu contribución (que no es poca) en esta tesis.

Gracias a mi familia, mi madre, José y Kike. Y, por supuesto, gracias a Yulya, Lena y Edu.

RESUMEN

La optimización y caracterización de parámetros de dispositivos fotovoltaicos (FV) engloba un amplio número de aspectos, todos ellos destinados a la mejora de la eficiencia de la energía fotovoltaica. Para este propósito, esta tesis se ha centrado en tres aspectos fundamentales:

1. ESTUDIO DE LA RESISTENCIA PARALELO (R_p) Y SU DETERMINACIÓN EN CÉLULAS Y MÓDULOS.

Se presenta un nuevo método para medir la resistencia paralelo, R_p , de un módulo FV en condiciones de polarización inversa y oscuridad, por medio de la utilización de una resistencia externa en paralelo. Para comprobar este método, se han fabricado dos módulos, MA y MB (con el mismo tipo de células y la misma eficiencia, pero con resistencia paralelo diferente). La R_p de ambos módulos ha sido determinada con el método propuesto y los resultados han sido comparados con los obtenidos a partir de las medidas de curvas I-V en simuladores solares comerciales y otros procedimientos estándar. Por otro lado, los módulos MA y MB, han sido medidos a distintas irradiancias para relacionar la resistencia paralelo, R_p , con la eficiencia del módulo a distintas irradiancias. Por último, con el fin de poner de relieve la importancia de una correcta determinación de R_p , se han realizado, con el programa PVsyst, varias simulaciones de instalaciones hechas con los módulos MA y MB, obteniéndose así la Energía Anual Acumulada.

2. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA DISPERSIÓN EN CÉLULAS SOLARES SOBRE LA PÉRDIDA RELATIVA DE POTENCIA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.

En este apartado se presenta un estudio de las pérdidas de potencia por *mismatch* cuando las células son conectadas en serie para formar módulos FV. En este experimento se han utilizado más de 10000 células monocristalinas y multicristalinas, las cuales fueron medidas y clasificadas en grupos de acuerdo a su potencia máxima (P_m), corriente en cortocircuito (I_{sc}) y corriente en el punto de máxima potencia (I_{mp}). Posteriormente, se fabricaron módulos FV con células provenientes de cada grupo. Se estudiaron células monocristalinas de eficiencia 17,75%, las cuales mostraron una Pérdida de Potencia Relativa (o Relative Power Loss, RPL) inferior a los límites de detección de los sistemas de medida empleados. El RPL obtenido, incluso cuando la dispersión de los parámetros eléctricos de célula fue aumentada deliberadamente, también resultó ser muy bajo. Debido a esto, se amplió el estudio a una selección de

células multicristalinas. En esta segunda selección, las células multicristalinas mostraban una dispersión mayor de parámetros eléctricos en las dos clasificaciones realizadas (eficiencia 14,57% y 14,23%). En este caso, los resultados obtenidos para ambas clasificaciones sí mostraron una relación entre el RPL y la desviación estándar de los parámetros eléctricos. Aunque existe ya una definición de RPL ampliamente utilizada, debido al gran volumen de células que se emplean en ambientes de producción, que es donde ha tenido lugar este estudio, se ha hecho patente la necesidad de una expresión de RPL más efectiva y práctica. Por tanto, en esta tesis se propone una ecuación de RPL estadística y novedosa, que es relevante para las necesidades crecientes del sector FV, y la cual relaciona los parámetros que habitualmente están disponibles para un fabricante de módulos. Dicha expresión ha sido validada mediante su comparación con los resultados de Bucciarelli (1979). La expresión propuesta ha sido utilizada en este estudio obteniéndose así una relación empírica entre la desviación estándar de los parámetros eléctricos de las células solares y el RPL.

3. ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA TEXTURA SUPERFICIAL DE CÉLULAS MONOCRISTALINAS Y SU CARACTERIZACIÓN.

En este tercer objetivo, se ha realizado un proceso químico de texturizado de células solares en laboratorio, y se ha comparado con el llevado a cabo en una línea industrial. De esta manera, se ha estudiado la influencia de algunos parámetros del proceso, tales como calidad de la oblea y tiempo de proceso.

Se ha desarrollado un método novedoso para la medida de la textura superficial en obleas de silicio monocristalino texturizadas. Este se basa en hacer incidir un haz láser perpendicularmente a la superficie de las mismas. El patrón de reflexión obtenido de este modo, posee una simetría de orden cuatro, es decir, con cuatro máximos de intensidad. En este estudio se ha establecido una relación entre las características de la geometría de la textura y el mencionado patrón espacial de la luz reflejada. Además se ha desarrollado y probado un dispositivo y un método de medida que relaciona las intensidades de la luz reflejada con el grado de textura (o factor de textura). El método desarrollado permite su aplicación en entornos industriales, al ser fácilmente reproducible, fiable y de bajo coste.

ABSTRACT

The optimization and characterization of parameters of photovoltaic (PV) devices involves a wide number of aspects all of them aimed to the improvement of the efficiency of PV Energy. For that purpose, this thesis has focused in three fundamental subjects:

1. STUDY OF PARALELL RESISTANCE (R_p) AND ITS CHARACTERIZATION IN SOLAR CELLS AND PV MODULES.

A new method to measure the module shunt resistance (R_p) by measuring the module at reverse bias and dark conditions connected to an external parallel resistance is presented. For the purpose of proving this method, two modules, MA and MB, (with the same type of cells and the same efficiency, but different shunt resistance) were manufactured. The module R_p has been determined with the proposed method and results have been compared with I-V curve measurements obtained with commercial Solar simulators and other standard procedures. Additionally, modules MA and MB were measured at different irradiance levels to relate the R_p with the module performance at low irradiance conditions. Finally, in order to evaluate the relative importance of a correct determination of the module R_p , a simulation of Annual Energy Yield obtained with an installation made with modules MA compared with modules MB have been carried out by means of PVsyst program.

2. ESTUDY OF THE INFLUENCE OF MISMATCH OF SOLAR CELLS ON RELATIVE POWER LOSS OF PHOTOVOLTAIC MODULES.

This work presents a study of mismatch losses when solar cells are associated in series to form photovoltaic (PV) modules. In this experiment, more than 10,000 single-crystal and multi-crystal cells were measured and sorted in groups, according to cell maximum power (P_m), maximum power point current (I_{mp}) and short circuit current (I_{sc}). Afterwards, PV modules were manufactured and measured with cells from each group. A selection of single-crystal cells with an efficiency rate of 17,75 % was studied with results showing low relative power loss (RPL) rates. This was the case even when artificially increasing the scattering of mentioned electrical parameters. Due to these results, a second choice was made to perform a similar comparative study of multi-crystal cells. In the second study, the multi-crystal cells showed a greater scattering of electrical parameters in groups of a 14,57% efficiency rate and of a 14,23% rate. In that

case, results obtained for both groups showed a relation between RPL and standard deviation of electrical parameters. Despite there already being a widely recognized definition of RPL, due to the increased volume of cells in production environments, which is where this study was performed, the need was found for more effective and practical expression of RPL due to the large quantity of samples. Consequently, this study proposes an innovative statistical equation of RPL relevant for the growing needs in this sector which can handle the parameters usually available to a module manufacturer. This equation is theoretically validated by comparison with Bucciarelli's results (1979). The proposed expression of RPL has been applied to this study and an empirical relation between RPL and standard deviation of solar cell parameters has been obtained.

3. ESTUDY OF THE QUALITY OF THE TEXTURE OF SINGLE-CRYSTAL SOLAR CELLS AND ITS CHARACTERIZATION.

In this third aim, the chemical process for solar cell texturing has been carried out in the laboratory and compared with the one carried out in a manufacturing line. Different process parameters, such as wafer quality and time, have been changed to optimize the process.

A new method for measuring the surface texture of single-crystal wafers has been developed. This is based on an incident laser beam directed towards the surface at a normal angle. The light reflected pattern so obtained exhibits 4-fold symmetry with intensity maxima at well-defined off centre angular positions. The relation between the spatial light pattern and the geometrical features of the texture is discussed. A method and device that relate the reflected intensities with the texture degree is developed and tested. The developed method permits its implementation in industrial environments due to its reproducibility, reliability and low cost.

ÍNDICE

<u>GLOSARIO</u>	1
<u>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</u>	7
<u>Capítulo 2. ESTUDIO DE LA RESISTENCIA PARALELO (R_p) Y SU DETERMINACIÓN EN CÉLULAS Y MÓDULOS</u>	11
2.1. INTRODUCCIÓN.....	11
2.2. ESTADO DEL ARTE.....	17
2.2.1. DETERMINACIÓN DE R_p EN CÉLULAS SOLARES.....	17
2.2.2. DETERMINACIÓN DE LA R_p EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	23
2.2.3. INFLUENCIA DE LA R_p EN LA EFICIENCIA DEL DISPOSITIVO FV A DISTINTAS IRRADIANCIAS.....	25
2.3. OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO.....	28
2.4. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	31
2.4.1. CÉLULAS SOLARES.....	31
2.4.1.1. Descripción y clasificación de las células solares utilizadas.....	31
2.4.1.2. Medida de R_p de células solares en sistemas comerciales.....	34
2.4.2. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	36
2.4.2.1. Fabricación de los módulos fotovoltaicos.....	36
2.4.2.2. Caracterización de los módulos fotovoltaicos.....	37
2.4.2.3. Propuesta de método de medida de R_p en módulos.....	45
2.4.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE CÉLULA Y MÓDULOS.....	55
2.4.3.1. Modelo de asociación.....	55
2.4.3.2. Medida de R_p de células embebidas en los módulos.....	58
2.4.3.3. Comparación entre los valores de R_p obtenidos en la célula y el módulo.....	65
2.4.4. MEDIDA DE LOS MÓDULOS A DISTINTAS IRRADIANCIAS.....	66
2.4.5. PREDICCIÓN DE ENERGÍA ANUAL PRODUCIDA CON DOS TIPOS DE MÓDULOS.....	69
2.5. RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	74
<u>Capítulo 3. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA DISPERSIÓN EN CÉLULAS SOLARES SOBRE LA PÉRDIDA RELATIVA DE POTENCIA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS</u>	77
3.1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE.....	77
3.2. OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO.....	80
3.3. PREPARACION DE LAS MUESTRAS, MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	85
3.3.1. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS.....	85
3.3.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN CÉLULAS MONOCRISTALINAS (GRUPOS α Y β).....	87
3.3.2.1. Clasificación según I_{sc} . Subgrupo $\alpha 1775$	89
3.3.2.2. Medida de módulos con células del subgrupo $\alpha 1775$	93
3.3.2.3. Clasificación según I_{mp} . Subgrupo $\beta 1775$	95
3.3.2.4. Medida de módulos con células del grupo $\beta 1775$	99

3.3.3. RESULTADOS OBTENIDOS EN CÉLULAS MULTICRISTALINAS (GRUPO δ).....	101
3.3.3.1. Procedimiento y resultados.....	101
3.3.3.2. Clasificación según Pm. Grupo δ	102
3.3.4. RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	112
3.3.4.1. Células monocristalinas (grupos α y β).....	112
3.3.4.2. Células multicristalinas (grupo δ).....	114
3.4. CÁLCULO DEL RPL TEÓRICO Y SU COMPARACIÓN CON EL EXPERIMENTAL.....	117
3.4.1. DESARROLLO DEL RPL SEGÚN BUCCIARELLI.....	117
3.4.2. DEFINICIÓN DEL RPL PROMEDIO Y COMPARACIÓN CON BUCCIARELLI.....	123
3.4.3. RESULTADOS DE LOS GRUPOS α Y β	131
3.4.4. RESULTADOS DEL GRUPO δ	133
<u>Capítulo 4. ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA TEXTURA SUPERFICIAL DE CÉLULAS MONOCRISTALINAS Y SU CARACTERIZACIÓN</u>	137
4.1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE.....	137
4.1.1. TEXTURIZADO DE SILICIO MONOCRISTALINO.....	138
4.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL GRADO DE TEXTURA DE LAS OBLEAS DE SILICIO MONOCRISTALINO.....	141
4.2. OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO.....	143
4.3. TEXTURIZADO EXPERIMENTAL DE OBLEAS MONOCRISTALINAS.....	144
4.3.1. TEXTURIZADO EN PROCESOS INDUSTRIALES.....	144
4.3.2. TEXTURIZADO EN LABORATORIO.....	153
4.4. DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL GRADO DE TEXTURA DE OBLEAS MONOCRISTALINAS.....	161
4.4.1. MOTIVACIÓN Y FUNDAMENTOS.....	161
4.4.2. CONSTRUCCIÓN DEL PRIMER PROTOTIPO DE MEDIDA.....	164
4.4.3. CONSTRUCCIÓN DEL SEGUNDO PROTOTIPO Y MÉTODO DE MEDIDA.....	170
4.4.4. CONCLUSIONES.....	179
<u>Capítulo 5. RESUMEN Y APORTACIONES</u>	181
<u>ANEXO A. CÁLCULO DE ERRORES</u>	185
<u>ANEXO B. PROCESOS DE FABRICACIÓN DE LAS CÉLULAS SOLARES UTILIZADAS</u>	195
<u>ANEXO C. PROCESOS DE FABRICACIÓN DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS</u>	203
<u>REFERENCIAS</u>	207

GLOSARIO

A : Factor de idealidad de un diodo.

A_1 : Factor de idealidad del diodo 1 para el caso del modelo de dos diodos.

A_2 : Factor de idealidad del diodo 2 para el caso del modelo de dos diodos.

B_e : Coeficiente adimensional cuasi-constante de ajuste para la ecuación de $I(V)$ en polarización inversa.

C : Parámetro de ajuste cuadrático del numerador de la ecuación de $I(V)$ en polarización inversa (I_N).

C : Parámetro de característica de la célula.

CTM : *Cell to module loss*. Pérdidas de células a modulo o pérdidas por encapsulado.

DER : Desviación estándar relativa.

e : Carga eléctrica del electrón.

FF : Factor de forma de un dispositivo fotovoltaico.

G_{ref} : Irradiancia medida a un determinado valor de referencia.

G : Irradiancia.

G : Factor de textura.

G_{2n} : Factor de textura en el caso del primer prototipo (simetría de orden 2).

I : Intensidad eléctrica.

I_D : Corriente que circula por el diodo de un dispositivo fotovoltaico para el modelo de un diodo.

I_{D1} : Corriente que circula por el diodo 1 de un dispositivo fotovoltaico para el modelo de dos diodos.

I_{D2} : Corriente que circula por el diodo 2 de un dispositivo fotovoltaico para el modelo de dos diodos.

I_E : Corriente que circula por la resistencia paralelo externa en el método de resistencia externa.

I_L : Corriente fotogenerada en un dispositivo fotovoltaico.

I_m : Corriente en el punto de máxima potencia de la asociación en serie de un conjunto de células. En nuestro caso esto es la corriente en el punto de máxima potencia de un módulo.

$\overline{I_M}$: Media de la corriente en el punto de máxima potencia de cada una de las células, medidas individualmente, que hay dentro de un módulo (muestra).

I_{mp} : Corriente en el punto de máxima potencia de una célula fotovoltaica.

$\overline{I_{mp}}$: Media de la corriente en el punto de máxima potencia de un conjunto de células. En este estudio el conjunto de células es la agrupación.

I_N : Corriente primaria efectiva de un dispositivo fotovoltaico en polarización inversa.

I_{nb} : Corriente primaria efectiva de un dispositivo fotovoltaico en polarización inversa y evaluada en el voltaje de disrupción (V_b).

I_p : Corriente que pasa por la resistencia paralelo interna del dispositivo fotovoltaico.

i_r : Corriente normalizada de una célula en el desarrollo de Bucciarelli.

I_R : En el método de resistencia externa, corriente de referencia existente en los terminales del módulo cuando no existe resistencia paralelo externa.

I_{rev} : Corriente, en polarización inversa y en oscuridad, de una célula medida por el *cell tester* a -16V.

I_{R0} : En la variante del método de resistencia externa, corriente de referencia existente en los terminales del módulo cuando no existe resistencia paralelo externa y medida para el voltaje de referencia (V_R).

I_{R2} : En la variante del método de resistencia externa, corriente de referencia existente en los terminales del módulo cuando existe resistencia paralelo externa y medida para el voltaje de referencia (V_R).

I_s : Corriente inversa de saturación de un diodo para el modelo de un diodo.

I_{s1} : Corriente inversa de saturación del diodo 1 para el modelo de dos diodos.

I_{s2} : Corriente inversa de saturación del diodo 2 para el modelo de dos diodos.

I_{sc} : Corriente de un dispositivo fotovoltaico en cortocircuito ($V=0$).

I^* : Máxima corriente en la región cuasi-lineal de un módulo cuando alguna de sus células es tapada.

k : Contante de Boltzman.

K_e : Coeficiente de multiplicación de electrones en la ecuación de la corriente en polarización inversa.

M : Número de módulos fabricados por las células de una determinada agrupación

MML : *Mismatch Losses*. Pérdidas por mismatch.

N : Número de células dentro de un módulo.

P_m : Potencia máxima de una célula

P_{mp} : Potencia de la serie de células en el punto de máxima potencia (en nuestro caso es la potencia máxima del módulo).

P_{max} : Promedio de la potencia máxima (P_m) de las células de una determinada agrupación.

P_{maxB} : En el desarrollo de Bucciarelli, es la suma de las potencias máximas (P_m), de las células por separado (sin estar asociadas).

P_{mod} : Promedio de las potencias máximas (P_{mp}) de los módulos fabricados con las células de una determinada agrupación.

PPE : Perdidas por encapsulado.

$PPRs$: Pérdidas por resistencia serie.

- R** : Reflectancia.
- R^2** : Coeficiente de regresión de una ajuste, lineal o cuadrático.
- R_E** : Resistencia paralelo externa en el método de resistencia externa.
- R_p** : Resistencia paralelo interna de un dispositivo fotovoltaico.
- R_{p0}** : Resistencia paralelo de un dispositivo fotovoltaico evaluada en las proximidades de cortocircuito ($V \approx 0$).
- R_{ct}** : Resistencia paralelo (de un dispositivo fotovoltaico) independiente de la irradiancia.
- R_{pe}** : En el método de la resistencia externa, resistencia paralelo equivalente.
- R_{pE}** : Resistencia paralelo (de un dispositivo fotovoltaico) dependiente de la irradiancia.
- R_s** : Resistencia serie de un dispositivo fotovoltaico.
- R_{s0}** : Resistencia serie de un dispositivo fotovoltaico evaluada en las proximidades de circuito abierto o V_{oc} ($I=0$)
- R_p^{exp}** : En la fórmula de la resistencia paralelo en función de la irradiancia de Mermoud, es un factor empírico de parametrización.
- \overline{RPL}_E** : Promedio de las pérdidas de potencia relativas experimentales de los módulos de una determinada agrupación.
- \overline{RPL}_B** : Promedio de las pérdidas de potencia relativas experimentales de los módulos de una determinada agrupación según la fórmula de Bucciarelli.
- r_π** : Coeficiente de reflexión de la luz en el caso de luz incidente con polarización perpendicular al plano de incidencia.
- r_σ** : Coeficiente de reflexión de la luz en el caso de luz incidente con polarización paralela al plano de incidencia.
- t** : Tiempo.
- T** : Temperatura.

- V : Voltaje medido en los terminales del dispositivo fotovoltaico.
- V_b : Voltaje de disrupción.
- V_{mp} : Voltaje en el punto de máxima potencia de un dispositivo fotovoltaico.
- $\overline{V_{mp}}$: Media del voltaje en el punto de máxima potencia de un conjunto de células.
En este estudio el conjunto de células es la agrupación.
- V_R : Voltaje de referencia en el método de resistencia externa.
- V_T : Voltaje térmico.
- V_{oc} : Voltaje en el punto de circuito abierto ($I=0$).
- v_r : Voltaje normalizado de una célula en el desarrollo de Bucciarelli.
- λ : Longitud de onda de la radiación electromagnética.
- Φ_T : Potencial termodinámico.
- θ : Ángulo de detección de la luz láser reflejada por una oblea texturizada.
- σ : Desviación estándar.
- σ_μ : Desviación estándar relativa o DER.

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En los últimos años y debido a un fuerte ajuste de costes en el sector de la energía solar fotovoltaica (FV), esta se ha establecido como una de las principales energías renovables en el mundo. El mencionado ajuste ha conseguido que los costes de esta energía se hayan reducido en más de un 75% en los últimos 5 años. Las causas que han conseguido dicha reducción han sido diversas; por un lado la disminución de los gastos relacionados con la fabricación, como son la inversión de capital en maquinaria, la reducción de costes de los materiales a lo largo de toda la cadena de valor, la mejora de rendimiento en los procesos de fabricación, etc. Por otro lado se ha producido un aumento constante en la eficiencia de las células y módulos fotovoltaicos así como una mejora de la fiabilidad y durabilidad de los mismos.

No obstante, los campos en los que existe aún un amplio margen de mejora, tanto en células como en módulos, son todavía muchos. También, son continuos los esfuerzos realizados por la industria para la optimización de los procesos de fabricación y caracterización de células solares y módulos fotovoltaicos. Sin embargo, existen actualmente muchas peticiones de ayuda de la industria a los centros de investigación para la mejora de dichos procesos, además de para el desarrollo de nuevos sistemas de caracterización de parámetros “clave” que permitan mejorar la calidad y la eficiencia de los dispositivos fotovoltaicos.

La presente tesis nació de la necesidad de la industria de mejora de dichos procesos de fabricación de dispositivos fotovoltaicos. Concretamente se centra en la investigación de dispositivos fotovoltaicos cristalinos de homounión, que son los más ampliamente utilizados en el mercado. El autor ha desarrollado su trabajo como profesional desde el marco de la industria FV, pero siempre en colaboración con centros de investigación,

como son el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM (CSIC)), el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y la Universidad de Alcalá (UAH). A lo largo de la experiencia profesional del autor, tanto en la fabricación como en la caracterización de dispositivos fotovoltaicos, se han identificado e investigado diversas posibilidades de mejora de dichos dispositivos, siendo las tres siguientes, las elegidas para esta tesis:

- Correcta caracterización de la resistencia paralelo de células y módulos FV y su relación con la eficiencia de los mismos a distintas irradiancias, (Capítulo 2).
- Determinación cuantitativa de la pérdida de potencia relativa (o Relative Power Loss, RPL) de los módulos FV y su relación con la desviación estándar de los parámetros eléctricos de células, (Capítulo 3).
- Caracterización de la textura de las células solares responsable del aumento de absorción de la luz incidente, (Capítulo 4).

El trabajo de investigación que queda plasmado en esta tesis se ha desarrollado en colaboración con diversos centros de investigación. Los resultados obtenidos son, además, de aplicación directa a la industria.

El enfoque utilizado para abordar cada uno de estos tres aspectos es el siguiente:

- a) Estudio y caracterización de la **resistencia paralelo** de los dispositivos fotovoltaicos; células y módulos.

Las derivaciones o “*shunts*” resultan de cualquier circuito o vía por la que circulan los portadores de carga en paralelo con la unión p-n que forma el dispositivo. Estas derivaciones pueden producirse a través de la propia unión p-n o a través del borde de la célula en el caso de haberse realizado un mal aislamiento de dicho borde. Las derivaciones se han convertido en una de las mayores preocupaciones de la industria fotovoltaica, principalmente por su implicación directa en la formación de los puntos calientes, que son zonas de área reducida, localizadas tanto en células como en módulos FV, que presentan un elevado aumento de la temperatura. En el caso de células, la resistencia paralelo es el mejor indicador de la existencia de esas

derivaciones, de manera que cuando el valor de dicha resistencia es excesivamente bajo (típicamente inferior $1\ \Omega$), suele ser indicativo de una derivación muy localizada y que probablemente originará un punto caliente en la célula en algún momento de su vida útil dentro del módulo FV. El estudio y caracterización de los puntos calientes es un tema ampliamente estudiado, que queda fuera del objetivo de esta tesis, que en este sentido se ha centrado en la correcta determinación de la R_{sh} . Este parámetro es, además, un buen indicador del comportamiento eléctrico de las células en condiciones de baja irradiancia. La eficiencia de las células a baja irradiancia (menor a $600\ \text{W/m}^2$) es menor para células con menor resistencia paralelo. Este hecho puede llevar a una merma de energía generada a lo largo del tiempo, especialmente en países con baja irradiación.

En esta parte de la tesis, el estudio se centrará en el desarrollo de nuevos métodos de determinación de la resistencia paralelo de células y módulos, así como la influencia de la misma en la eficiencia de los dispositivos fotovoltaicos a distintas irradiancias. Esta influencia, añadida a la relación entre la calidad de la célula y la resistencia paralelo, redonda en la necesidad de un método para la correcta determinación de la misma.

- b) Estudio y caracterización de la asociación en serie de células con una determinada **desviación estándar** de los parámetros eléctricos (lo que se conoce en inglés como “*mismatch*”) y su influencia en la Pérdida de Potencia Relativa del módulo fotovoltaico o RPL.

Una de las causas más importantes de pérdida de potencia en la fabricación de módulos es la agrupación de células con parámetros eléctricos muy diferentes. Esa diferencia o dispersión en los parámetros eléctricos de dispositivos fotovoltaicos que son conectados entre sí se conoce también, como ya se ha indicado, como “*mismatch*”.

Un término ampliamente utilizado es el conocido como Pérdida de Potencia Relativa (o *Relative Power Loss, RPL*), que es la diferencia de potencia entre la asociación de dispositivos (ya sea en serie o en paralelo o la combinación de ambos) y la suma de las potencias individuales de cada uno de los dispositivos por separado.

En esta tesis se pretende cuantificar la Pérdida de Potencia Relativa del módulo fotovoltaico en relación a la dispersión de los parámetros eléctricos de las células solares que lo conforman. Debido a la orientación a la industria de la tesis, se utilizarán, para este estudio, parámetros eléctricos y dispersiones similares a los estándares de la industria, así como la relación entre esas dispersiones y el RPL. De estos resultados se derivará la necesidad, o no, de una clasificación adicional a la aportada por un fabricante de células.

c) Estudio y caracterización del **grado de textura** de las células fotovoltaicas monocristalinas.

Un paso esencial para mejorar la eficiencia de conversión de luz incidente en potencia eléctrica de las células fotovoltaicas, consiste en inducir una textura en la superficie de la célula. Esta textura posibilita reflexiones múltiples en dicha superficie, y por tanto, aumenta la probabilidad de que la luz sea absorbida por la célula. El método usual para el desarrollo de la textura en obleas de silicio monocristalino es el de un ataque químico consistente en la inmersión de las obleas en baños cáusticos para producir un ataque preferencial en ciertos planos cristalinos del Si. El ataque da lugar a una distribución aleatoria de estructuras geométricas con forma de pirámide de base cuadrada, todas ellas con la misma orientación.

El estudio del texturizado de células solares es un paso crítico para la mejora de la eficiencia de las mismas. Así, se analizará dicho proceso y su influencia en la absorción de la luz. Por último, se presenta un dispositivo y método de medida patentados, para la caracterización de la textura de células monocristalinas.

Esta memoria consta de 5 capítulos. Tras este primer capítulo de introducción y objetivos globales, se ha dedicado un capítulo a cada uno de los tres temas antes mencionados. Por último, en el capítulo 5 se recogen las conclusiones obtenidas a lo largo de la tesis y las contribuciones de la misma. Además, al final de la memoria se han incluido 3 apéndices que aportan datos y consideraciones adicionales que pueden resultar de interés para mejorar la comprensión de los estudios realizados.

Capítulo 2

2. ESTUDIO DE LA RESISTENCIA PARALELO (R_p) Y SU DETERMINACIÓN EN CÉLULAS Y MÓDULOS

2.1. INTRODUCCIÓN

Como ya se ha comentado en la introducción general (Capítulo 1), la industria fotovoltaica ha ido reduciendo drásticamente sus costes de fabricación y puesta en operación. Este ajuste ha sido favorecido por el aumento constante en la eficiencia de los dispositivos fotovoltaicos y por la mejora de la fiabilidad y durabilidad de los mismos.

El aumento de la eficiencia de células y módulos ha ido progresando con la optimización de diversos parámetros característicos de los dispositivos fotovoltaicos, entre ellos la resistencia serie (R_s) y la resistencia paralelo (R_p). Los esfuerzos destinados a la disminución de la R_s y al aumento de la R_p han contribuido directamente al incremento de dicha eficiencia. El presente capítulo se centra en el estudio y la caracterización de la resistencia paralelo de las células y módulos. Este parámetro suele representar las fugas de corriente, proporcionales a la tensión, que tienen lugar en el dispositivo FV, y su origen puede deberse a un mal aislamiento de los bordes de la célula, picos de difusión a lo largo de dislocaciones o fronteras de grano (si las hubiera), pequeños agregados de contaminantes a través de microdefectos, etc. La resistencia paralelo es, por tanto, un parámetro representativo de las derivaciones o *shunts*.

Las derivaciones o “*shunts*” resultan de cualquier circuito o vía por la que circulan los portadores de carga y que puentean la unión $p-n$, pudiendo producirse a través de la misma o a través del borde de la célula en el caso de haber tenido lugar un mal aislamiento de dicho borde. Las derivaciones se han convertido en una de las mayores preocupaciones de la industria fotovoltaica, principalmente por su implicación directa en la formación de los puntos calientes (“*hot spots*” en inglés) [1] [2].

Cuando dentro de un módulo, existe alguna célula cuya corriente de cortocircuito, en las condiciones de operación, es inferior a la corriente de operación del resto de células, bien por rotura, por sombras, o por porque su eficiencia es muy inferior al resto (“*mismatch*”), dicha célula es forzada a trabajar en operación inversa, disipando potencia y, consiguientemente, aumentando su temperatura. Este aumento de temperatura puede llegar a formar un punto caliente cuando la corriente que pasa a través de la célula se concentra en una zona reducida, causando por tanto temperaturas muy elevadas en dicha área. El estudio de células trabajando en polarización inversa y sus consecuencias sobre la integridad de células y módulos ha sido publicado por diferentes investigadores [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14]. En algunos de ellos se relaciona la formación de puntos calientes perjudiciales con la presencia de defectos en la célula [1] [11] [12] [13] [14] [15]. Así mismo se encontró una correlación entre la aparición de puntos calientes dañinos y la resistencia paralelo, observándose que en células con resistencia paralelo baja se producían distribuciones de temperatura menos uniformes al forzarlas a trabajar en operación inversa [6] [15] [16] [17]. Esto provocaba calentamientos severos muy localizados que podían llegar a producir un deterioro permanente de los materiales que conforman el módulo; encapsulante (generalmente EVA), lámina posterior, etc, así como de la célula en sí misma. Por otro lado, en el caso de una célula sombreada, si la resistencia paralelo es baja, los diodos de paso del módulo pueden no activarse dejando el módulo sin protección contra los puntos calientes [6] [18].

Durante la fabricación, tanto de células como de obleas, existen varios procesos críticos que pueden llevar a la formación de defectos que originen derivaciones:

- a) En el caso de la fabricación de células, existe un proceso denominado sinterizado, o su traducción en inglés, "*firing*", más comúnmente utilizada. Este consiste en un proceso térmico que provoca la penetración de la plata y del aluminio de la cara posterior de la célula y la penetración de la plata de los contactos frontales a través de la capa antirreflectante de nitruro de silicio. Un proceso demasiado agresivo, o la contaminación de los contactos de plata con partículas de aluminio, pueden provocar una penetración excesiva del metal, que alcanzaría la unión $p-n$ [19], la cual se encuentra generalmente a 300-400 nm de la superficie del silicio.

También se han identificado derivaciones en regiones de la célula donde se ha producido un daño mecánico, como pueden ser arañazos o truncado de pirámides por fricción. Esos daños mecánicos provocan la exposición del silicio debajo de la capa antirreflectante y la perforación de la unión $p-n$, de manera que, si se producen antes de la metalización de los contactos, se originará en ellos zonas de derivaciones por contacto directo con la metalización y, por tanto, regiones de puntos calientes visibles con termografía [14] [20].

Otro proceso crítico se produce después de la difusión de fósforo. En efecto, para la formación de la unión $p-n$ en obleas de tipo p , se realiza un proceso térmico de deposición química en fase vapor (CVD). En él, un líquido precursor del fósforo, el $POCl_3$, se introduce en un horno de deposición química en fase de vapor y a baja presión, LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition). Este proceso se realiza a altas temperaturas (en torno a 800°C) con lo que además de depositar el fósforo, también se produce un proceso de difusión del mismo hacia el interior de la oblea de silicio. Sin embargo, el fósforo no solo se deposita en la superficie de la célula, sino que también lo hace en el borde de la misma, provocando con ello el cortocircuito de la célula al conectar la cara positiva y negativa. Para evitar este fenómeno, después del proceso de difusión de fósforo, se realiza un aislamiento de los bordes de la célula. Existen varias formas de llevar a cabo este aislamiento eléctrico: a) mediante un ataque por plasma de los bordes de la misma b) mediante una incisión previa por láser y posterior fractura de los bordes de la célula y c) mediante un ataque químico. Cualquiera de los procesos anteriores,

ineficientemente realizado (lo que se conoce como fallo de aislamiento), puede dejar partes del borde de la célula sin aislar, dando lugar a derivaciones [14] [19].

- b) En el caso de fabricación de obleas, otra posible causa que origina las derivaciones, es la presencia de impurezas intrínsecas al silicio (como pueden ser los agregados de metales) que están presentes en la unión p-n [21] [22]. Es menos común la formación de *shunts* en dislocaciones del silicio [14] [23]. Se han detectado también, en las células, inclusiones de nitruro de silicio (Si_3N_4), procedentes del recubrimiento del crisol durante el crecimiento del lingote multicristalino, que dan lugar también a derivaciones. Otros defectos que se originan durante el crecimiento del lingote, son precipitados de carburo de silicio (SiC), los cuales pueden provocar regiones de inversión de carga que llegan hasta el emisor, y que generalmente provocan derivaciones de tipo óhmico o lineales [14].

En diversos estudios, [11] [12] [13] [14], se han clasificado las derivaciones en dos grandes grupos: lineales u óhmicas, que presentan un comportamiento lineal con respecto al voltaje y generalmente es posible detectar (por electroluminiscencia o por termografía), tanto en polarización directa como en inversa, y las derivaciones no lineales o tipo diodo, las cuales se detectan principalmente en polarización directa.

Durante la realización de la presente tesis, se hicieron varias inspecciones de plantas de generación fotovoltaica y de líneas de fabricación de módulos, en las que se detectaron varios de los defectos mencionados. Las siguientes imágenes (*Figura 2-1* y *Figura 2-2*) fueron tomadas en dichas inspecciones.

En la inspección por termografía, según sea la naturaleza de las derivaciones, lineales o no-lineales, estas se harán visibles dependiendo del voltaje aplicado al módulo. Así, como se ha comentado anteriormente, las derivaciones no lineales se harán visibles sólo en polarización directa, mientras que las lineales son visibles tanto en polarización directa como en inversa, [11] [12] [13] [14].

Un ejemplo de las inspecciones en fábrica viene dado en la *Figura 2-1* izquierda. Esta imagen está tomada con una cámara termográfica mientras se le hace pasar al módulo una corriente en polarización directa. En ella se puede ver como varias células dentro del módulo presentan calentamientos localizados que son consecuencia de alguno de los procesos anteriormente mencionados.



Figura 2-1. Izquierda) Módulo fotovoltaico durante el test de termografía en fábrica. Al aplicarle una tensión positiva al módulo, la corriente que pasa a través de las células activa térmicamente las derivaciones eléctricas. Se pueden ver varias células con puntos brillantes donde se producen las derivaciones. Derecha) Imagen de infrarrojos de un punto caliente al aplicarse una sombra a un módulo de una instalación fotovoltaica. En este caso, la célula sombreada se encuentra polarizada en inversa.

En el caso de las inspecciones realizadas en plantas FV, estas se realizaron con una cámara termográfica cuando la planta está operando en régimen de trabajo, por tanto los módulos se encuentran polarizados en directa. Sin embargo, las células analizadas, debido a sombras proyectadas sobre ellas, se encuentran en polarización inversa, dando lugar a los puntos calientes observados en la *Figura 2-1* derecha. Este punto caliente puede ser debido al mencionado fallo de aislamiento. En este caso tan sólo en 10 segundos, la temperatura del punto caliente de la célula derecha llegó a 91°C mientras que el diodo de protección (o también llamado de paso) del módulo, como se ha descrito anteriormente, no se activó. Cuando la temperatura del módulo llega a

valores tan altos, el material encapsulante (EVA generalmente) y la lámina posterior se ven afectados, dando lugar a burbujas o incluso a quemaduras (Figura 2-2).

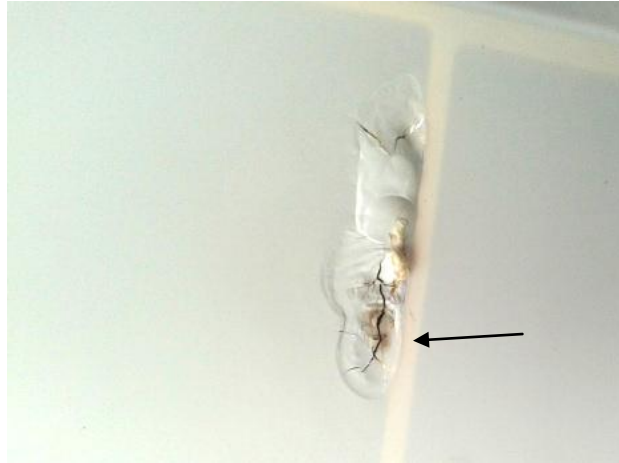


Figura 2-2. Fotografía de la parte posterior de un módulo en una instalación FV. En ella se puede observar una burbuja con perforación ocasionada por un punto caliente. También se puede apreciar una zona oscura o quemadura (señalada por una flecha) como consecuencia de las altas temperaturas alcanzadas.

La resistencia paralelo es también un buen indicador del comportamiento eléctrico de las células en condiciones de baja irradiancia [24] [25] [26] [27] [28]. La eficiencia de las células a baja irradiancia (menor a 600 W/m^2) es menor para células con menor resistencia paralelo [24] [25]. Este hecho lleva a una merma de energía generada a lo largo del tiempo, especialmente en países con baja irradiación. Se ha considerado que esta influencia de la R_p en la eficiencia del módulo a bajas irradiancias está menos estudiada, por lo que, en la presente tesis, se evaluará dicha relación.

2.2. ESTADO DEL ARTE

2.2.1. DETERMINACIÓN DE R_p EN CÉLULAS SOLARES

Por las razones anteriormente mencionadas, la determinación de la resistencia paralelo, R_p , en células solares es un aspecto de una gran importancia. Para su cálculo se han propuesto diferentes soluciones analíticas, algunas de ellas están basadas en el modelo de un diodo [3] [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [36]. Este modelo está esquematizado en la *Figura 2-3*.

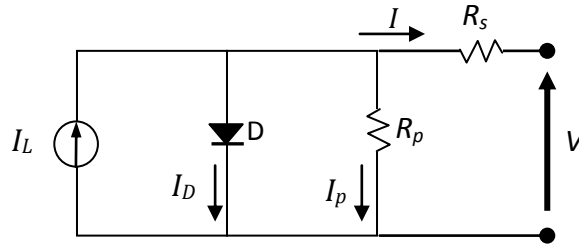


Figura 2-3. Esquema eléctrico de una célula solar con el modelo de 1 diodo

Según este modelo, la corriente eléctrica suministrada por una célula solar, expresada en la ecuación (2.1), viene dada por la diferencia entre la corriente fotogenerada, I_L , (debida a los portadores de carga generados por la radiación electromagnética incidente en la célula) y la corriente de diodo o corriente en oscuridad, I_D , (producida por la polarización con un voltaje externo en ausencia de iluminación). El tercer término de corriente sustraído a la corriente fotogenerada, es la corriente que pasa a través de la resistencia paralelo (I_p).

$$I = I_L - I_D - I_p = I_L - I_s \left(\exp \frac{V + IR_s}{AV_T} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.1)$$

En (2.1), $V_T = kT/e$ es el voltaje térmico, que viene expresado en función de la constante de Boltzman k , de la temperatura T y de la carga del electrón e . I_s es la corriente inversa de saturación del diodo. Las resistencias serie y paralelo vienen representadas por los términos R_s y R_p respectivamente.

En la expresión (2.1), el parámetro A representa el factor de idealidad de un diodo, el cual toma valores que tienden a la unidad ($A \rightarrow 1$) para un diodo en el que domina la recombinación en la región cuasi-neutral, mientras que A tiende a 2 ($A \rightarrow 2$) cuando la recombinación se produce en la región de carga espacial [37].

Utilizando el modelo descrito de un diodo, Charles [34] llegó a la siguiente expresión de la resistencia paralelo en células solares:

$$R_p = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{p0} - R_s}\right) - BI_s A_2} \quad (2.2)$$

donde I_s es la corriente de saturación y R_{p0} es la inversa de la pendiente de la curva I-V en la zona de cortocircuito (próximo al voltaje en el que se produce la corriente de cortocircuito, I_{sc}). R_s es la resistencia serie y B se relaciona con el voltaje térmico y A según la siguiente expresión:

$$B = \frac{q}{AkT} = \frac{1}{AV_T}, \quad (2.3)$$

y A_2 viene dado por la expresión:

$$A_2 = e^{BR_s I_{sc}}, \quad (2.4)$$

Phang *et al.* [38] aplican el modelo de un diodo y determinan las cinco variables presentes en la ecuación (2.1), I_L , I_s , R_s , R_p y A , mediante la resolución de dicha ecuación en cinco puntos conocidos de la característica I-V:

- Corriente de cortocircuito I_{sc}
- Voltaje de circuito abierto V_{oc}
- Voltaje y corriente correspondientes al punto de máxima potencia: V_{mp} , I_{mp}
- Pendiente de la curva I-V en la zona de circuito abierto: $R_{s0} = -\left(\frac{\partial V}{\partial I}\right)_{V=V_{oc}}$
- Pendiente de la curva I-V en la zona de cortocircuito: $R_{p0} = -\left(\frac{\partial V}{\partial I}\right)_{I=I_{sc}}$

La deducción completa [38] [39], da lugar a las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{V_{mp} + I_{mp}R_{s0} - V_{oc}}{V_T \left[\ln \left(I_{sc} - \frac{V_{mp}}{R_{p0}} - I_{mp} \right) - \ln \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p} \right) + \frac{I_{mp}}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{p0}}} \right]} \quad (2.5)$$

$$I_s = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p} \right) \cdot \exp \left(-\frac{V_{oc}}{AV_T} \right) \quad (2.6)$$

$$R_s = R_{s0} - \frac{AV_T}{I_s} \cdot \exp \left(-\frac{V_{oc}}{AV_T} \right) \quad (2.7)$$

$$I_L = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) + I_s \left(\exp \frac{I_{sc}R_s}{AV_T} - 1 \right) \quad (2.8)$$

$$R_p \cong R_{p0} \quad (2.9)$$

Phang *et al.*, en su estudio sobre la extracción de los 5 parámetros, aproximan la resistencia paralelo a la pendiente de la curva I-V en I_{sc} (ecuación (2.9)). Otros autores han realizado la misma aproximación: [40] [41].

La característica I-V de un dispositivo fotovoltaico también puede formularse matemáticamente mediante el modelo de dos diodos en paralelo, D_1 y D_2 , una resistencia serie (R_s) y una resistencia paralelo (R_p), tal y como viene esquematizado en el circuito eléctrico presentado en la *Figura 2-4*.

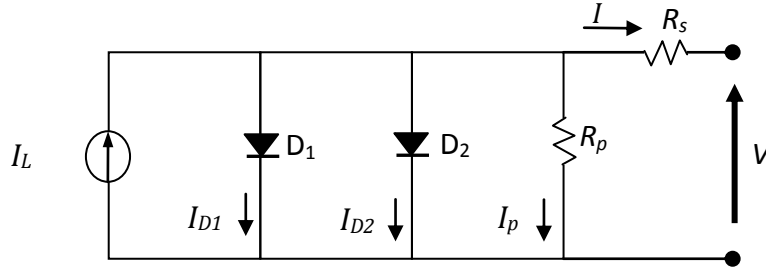


Figura 2-4. Esquema eléctrico de una célula solar con el modelo de 2 diodos

La ecuación que describe el modelo de dos diodos es la siguiente:

$$I = I_L - I_{s1} \left(\exp \frac{V + IR_s}{A_1 V_T} - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \frac{V + IR_s}{A_2 V_T} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p}, \quad (2.10)$$

donde A_1 , A_2 son los factores de idealidad de los diodos D_1 y D_2 respectivamente.

Este modelo se basa en la descripción de los procesos de recombinación en la región cuasi-neutral, con $A_1 \approx 1$ (representado por el segundo término de la ecuación (2.10)), recombinación en la región de carga espacial, con $A_2 \approx 2$ (tercer término de la ecuación) y en las resistencias serie y paralelo intrínsecas a la célula, (cuarto término) [32] [37]. El cálculo de la R_p puede, por tanto, también realizarse a partir de la ecuación (2.10), [32] [41] [42] [43].

Desde una aproximación más experimental, otros autores han estudiado la extracción de la R_p individual de las células embebidas en un módulo mediante el sombreado total o parcial de las mismas [44] [45] [46] [47] [48]. En esta situación, la célula sombreada presenta una corriente de cortocircuito, I_{sc} , que es proporcional al área

sombreada de la misma. En cualquier caso, si la I_{sc} es menor que la corriente de trabajo del resto de células que se encuentran en el módulo y que, por tanto, están en serie con la célula sombreada, dicha célula será polarizada en inversa y el exceso de corriente será forzado a pasar por su resistencia en paralelo [3].

Esto da lugar a una curva I-V característica para un módulo (Figura 2-5), en la que la primera parte de la curva, próxima a V_{oc} , presenta una forma cuasi-lineal que se corresponde con la curva I-V, en polarización inversa, de la célula sombreada. Esta forma se prolonga hacia voltajes menores hasta que se produce la activación del diodo de protección. A partir de dicho voltaje la curva del módulo muestra la misma forma que tendría si la célula no estuviera sombreada.

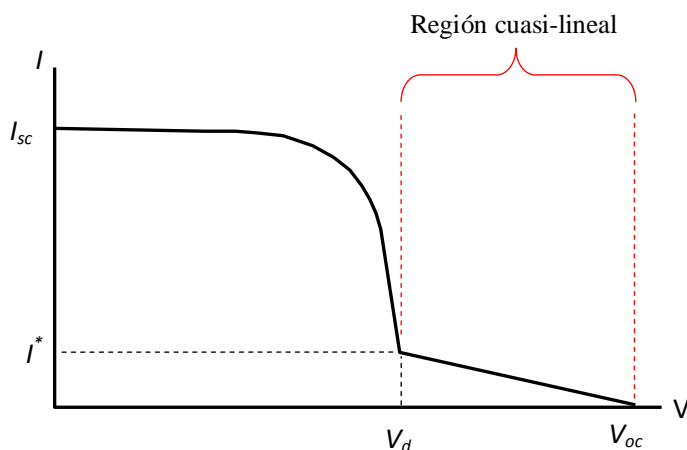


Figura 2-5. Curva I-V característica de un módulo FV cuando una de sus células es sombreada completamente. La parte recta de la gráfica se corresponde con el comportamiento de una célula polarizada en inversa (región cuasi-lineal). La parte izquierda de la curva corresponde al resto del módulo y se produce por la activación de los diodos de paso.

En una primera aproximación, si no ocurre el proceso de disrupción, se puede decir que la pendiente de la recta de la región cuasi-lineal se corresponde con la conductancia en paralelo o, dicho de otro modo, con la inversa de la resistencia paralelo (R_p). Sin embargo, hay que tener en cuenta que esta aproximación no siempre puede realizarse, ya que esta región no siempre presenta un comportamiento lineal, al existir otros fenómenos, como corrientes de generación y recombinación o el ya

mencionado proceso de disrupción [48], que influyen en el comportamiento de la corriente en relación al voltaje y, como consecuencia, en la resistencia paralelo.

M. C. Alonso-García *et al* [49] [5], propusieron la siguiente ecuación (2.11) para una célula en polarización inversa:

$$I = \frac{I_N}{1 - K_e} = \frac{I_N}{1 - \exp \left\{ B_e \left(1 - \sqrt{\frac{\Phi_T - V_b}{\Phi_T - V}} \right) \right\}}, \quad (2.11)$$

donde I_N representa conjuntamente a todas las componentes de corriente que se ven afectadas por la multiplicación en la forma de corriente efectiva. Las componentes de corriente mencionadas son: a) corriente total de huecos que entran en la región de carga espacial, b) corriente total de electrones que entran en la región de carga espacial y c) contribución total a la corriente de pares electrón-huevo generados en la región de carga espacial. Así mismo, en este caso, el coeficiente de multiplicación es el de electrones (K_e). Como se puede ver en la ecuación (2.11), K_e depende del voltaje de disrupción o avalancha (V_b) y de un coeficiente adimensional (B_e), que, en su trabajo, M. C. Alonso-García toma como valor constante e igual a 3 para todos los dispositivos. Por último Φ_T representa el potencial termodinámico.

Finalmente, I_N , puede ser representado por una parábola, ecuación (2.12), de forma que sus términos, constante y lineal con V , representen respectivamente la corriente de cortocircuito y la inversa de la resistencia paralelo. El término de curvatura, c , se puede obtener a partir del ajuste global de los datos experimentales.

$$I_N = I_{sc} - V/R_p + c \cdot V^2 \quad (2.12)$$

El cálculo de los parámetros de la ecuación (2.12) se hace mediante la extracción de los parámetros en aquellas regiones de la curva I-V en la que son más significativos. Por tanto, I_{sc} y R_p son calculados en las proximidades del cortocircuito (voltaje = 0). Así mismo, V_b es extraído cerca de la zona de disrupción mediante una regresión lineal del voltaje frente a la inversa de la corriente en el límite en el que la disrupción total tiene lugar, es decir, $I \rightarrow \infty$ y $V \rightarrow V_b$. Una vez que V_b , I_{sc} y R_p son conocidos, c se calcula para toda la curva I-V.

Por otro lado, D'Alessandro *et al* [47], llega a la siguiente expresión (2.13) para la resistencia paralelo (en esta ecuación denominada como $R_{p,dark}$) mediante la medida de la curva I-V obtenida sombreando la célula en cuestión dentro de un módulo iluminado:

$$R_{p,dark} \approx R_{qlm} + \left. \frac{dV_{string}}{dI_{string}} \right|_{V_{string}=V_{oc}} - N \cdot A \cdot V_T \cdot \left(\frac{1}{I_{sc}-I^*/2} - \frac{1}{I_{sc}} \right), \quad (2.13)$$

donde R_{qlm} , resulta del ajuste lineal de la curva I-V en la región cuasi-lineal. El segundo término se obtiene de la curva I-V de todo el módulo iluminado sin sombrear ninguna célula. Aquí, N es el número de células dentro del módulo e I^* es la corriente máxima alcanzada en la región cuasi-lineal (ver *Figura 2-5*).

2.2.2. DETERMINACIÓN DE LA R_p EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Para los fabricantes de módulos, es también importante conocer la resistencia paralelo de todo el módulo. Como se ha dicho anteriormente, la R_p tiene una influencia directa en la formación de puntos calientes y puede ser directamente determinada en el caso de una célula solar. Sin embargo, una vez que las células se encuentran asociadas en

serie para formar un módulo, se produce la adición de cada una de las R_p de las células del módulo [5]. Por tanto, la R_p final del módulo puede “enmascarar” la baja resistencia paralelo de una célula en particular. Además, el dato de la R_p del módulo permite predecir el comportamiento de dicho módulo en condiciones de baja irradiancia. En este sentido, algunos autores han propuesto diferentes métodos para la extracción de los parámetros eléctricos del módulo incluyendo la resistencia paralelo [40] [50] [51].

Para el caso de la medida de la R_p en módulos, Thongpron *et al.* [51] dieron la siguiente expresión (ecuación (2.14)) de la resistencia paralelo mediante la aplicación del método que denominan “two points-single curve”:

$$R_p = \frac{V_{oc}}{I_L - I_s(e^{BV_{oc}} - 1)} \quad (2.14)$$

En esta ecuación es necesario conocer la corriente fotogenerada (I_L), el factor de idealidad del diodo (implícito en $B=q/AkT$), y la corriente inversa de saturación del diodo (I_s). Sin embargo, estos parámetros normalmente no están incluidos en los datos nominales del módulo y es necesario, por tanto, calcularlos.

Otros autores [40] [41] [50], proponen el modelo de dos diodos para la extracción de los parámetros eléctricos del módulo. King *et al.* [50], hacen uso de la ecuación de los dos diodos (2.10), asumiendo que A_1 es igual a la unidad, mientras que A_2 es uno de los cinco parámetros a determinar junto con la resistencia serie y paralelo (R_s y R_p) y las corrientes de saturación de los dos diodos (I_{s1} y I_{s2}). Por otro lado su método experimental consiste en la obtención de las curvas I-V en polarización directa (aplicando voltajes positivos al terminal positivo del módulo) y en oscuridad, de manera que la corriente fotogenerada es igual a cero. Sin embargo, mientras que la determinación de los otros cuatro parámetros es bastante precisa y consistente con los valores previamente medidos en las células que conforman los módulos, el método muestra poca precisión en la extracción de la resistencia paralelo, dando valores de R_p muy dispersos, lo cual es debido, según se explica en su artículo, a la baja resolución en corriente de los equipos de medida utilizados.

2.2.3. INFLUENCIA DE LA R_p EN LA EFICIENCIA DEL DISPOSITIVO FV A DISTINTAS IRRADIANCIAS.

Se han publicado ya diversos estudios acerca de la influencia de la resistencia paralelo en la eficiencia de la célula y por extensión, en el módulo fotovoltaico [24] [25] [26] [27] [28]. Dichos estudios revelan que, a irradiancias altas la eficiencia del dispositivo FV se ve poco afectada por el valor de la R_p , mientras que a irradiancias bajas (inferiores a 600 W/m²), una baja R_p deriva en una sensible disminución de la eficiencia a medida que disminuye la irradiancia, tal y como se representa en la *Figura 2-6*. Por tanto, R_p es un buen indicador de la eficiencia del módulo en condiciones de baja irradiancia.

Esta relación, representada en la *Figura 2-6*, será estudiada en este capítulo con el fin de arrojar más luz a la relación entre la R_p medida en el módulo y la previsión de energía generada en condiciones de baja irradiación.

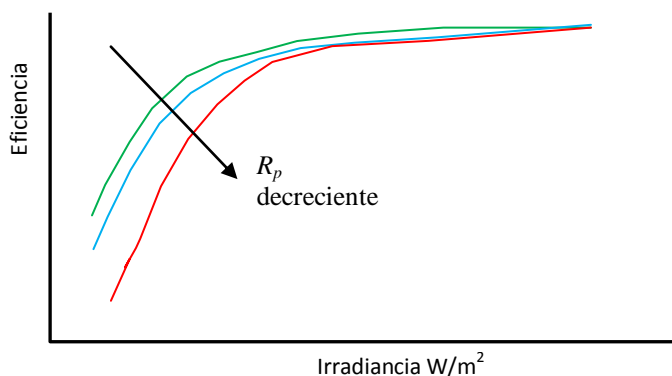


Figura 2-6. Curvas eficiencia vs irradiancia de módulos FV o células solares a distintos valores de resistencia paralelo, R_p . La influencia de la R_p se produce a valores bajos de irradiancia.

Algunos autores han estudiado la dependencia de la R_p del dispositivo fotovoltaico con la irradiancia, dando lugar a resultados contradictorios. Mermoud y Lejeune [52], en la aplicación de su modelo a mediciones reales de módulos expuestos a condiciones ambientales, encontraron una dependencia decreciente de la R_p con respecto a la

irradiancia. Tras medir durante 6 años las curvas I-V de varios módulos FV dispuestos en el exterior, Mermoud y Lejeune obtuvieron una gran cantidad de datos que representaron y aproximaron a la ecuación exponencial expresada en (2.15), donde G_{ref} es la irradiancia medida a un determinado valor de referencia, $R_p(0)$ es la resistencia paralelo medida en oscuridad y R_p^{Exp} es un factor obtenido experimentalmente, cuyo valor de 5,5 ofrece una buena aproximación para la mayoría de las tecnologías de módulos fotovoltaicos.

$$R_p = R_p(G_{ref}) + (R_p(0) - R_p(G_{ref})) \times e^{-R_p^{Exp} \left(\frac{G}{G_{ref}} \right)} \quad (2.15)$$

Si representamos la ecuación anterior, introduciendo los valores de los parámetros medidos en uno de los módulos fabricados para este estudio, se obtiene la gráfica de la *Figura 2-7*. En ella se puede ver que la resistencia paralelo del módulo decrece exponencialmente con la irradiancia.

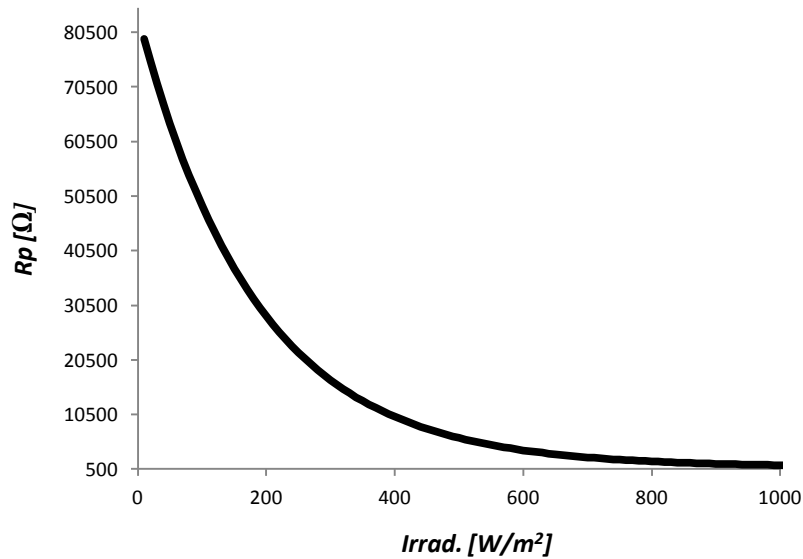


Figura 2-7. Curva obtenida introduciendo los parámetros pertenecientes a uno de los módulos de este trabajo en la ecuación propuesta por Mermoud et al [52], (ecuación (2.15))

Sin embargo, en su trabajo, Mermoud et al obtuvieron la ecuación (2.15) mediante la medida de la curva I-V en condiciones de iluminación variable (exterior). Cada curva

obtenida posee un total de sólo 30 puntos, lo que supone un número reducido de datos como para determinar todos los parámetros del dispositivo, especialmente la R_p , con precisión. Por otro lado, no se sabe hasta qué punto la temperatura influye en estos resultados.

Eikelboom y Reinders [53], en su estudio de la dependencia de la eficiencia con la irradiancia, obtuvieron también una relación entre la resistencia paralelo y la irradiancia, aunque en su caso, el decaimiento de la R_p con respecto a la irradiancia no es tan abrupto, presentando un comportamiento cuasi-lineal. Sin embargo, como ellos reconocen, no existe ninguna explicación teórica que describa esa dependencia.

En contrapartida Prianka *et al.* [30], propusieron un método para la determinación de la resistencia serie y paralelo de las células solares. En su estudio obtienen la suma de la resistencia serie y la resistencia paralelo, $(R_s + R_p)$, realizando la inversa de la pendiente en el tercer cuadrante, es decir, en polarización inversa. En la aplicación de dicho método, aunque sí se encontró una dependencia de la resistencia serie con la irradiancia, no fue así para R_p . En efecto, para la R_p , los resultados no mostraron ninguna dependencia con la irradiancia, contradiciendo así, los resultados obtenidos por Mermoud [52] y Eikelboom [53].

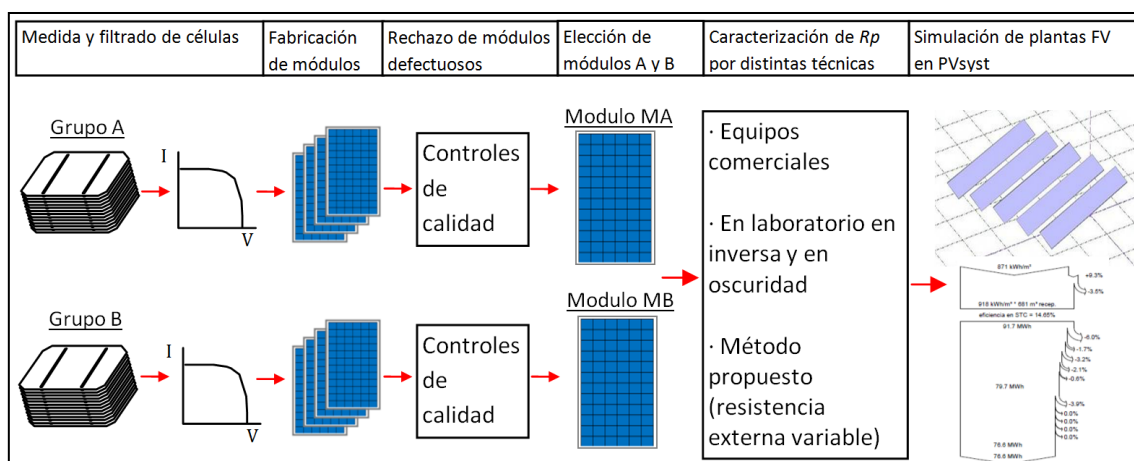
Es necesario mencionar que otros autores han detectado una dependencia de la R_p con la irradiancia para otras tecnologías, como por ejemplo las células solares policristalinas de lámina delgada [54]. Por otro lado, para células de heterounión la resistencia paralelo puede ser también dependiente de la irradiancia [55] [56]. Sin embargo, en el caso de las células cristalinas de homounión de alta calidad, que son el objeto del estudio de este capítulo, esta dependencia no es clara.

2.3. OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO.

La motivación del estudio realizado en este capítulo se basa en la necesidad de disponer de una herramienta fiable para la medida de la resistencia paralelo del módulo. Una vez caracterizada correctamente la R_p del módulo, esta podrá relacionarse con la generación eléctrica del módulo a distintas irradiancias. Esto será de gran utilidad para los fabricantes de módulos.

Actualmente, en el ámbito de la fabricación de módulos, la resistencia paralelo se mide en un equipo conocido como simulador solar o “*flash tester*” (ver Anexo A), en el que también se miden el resto de parámetros eléctricos. Sin embargo la medida de R_p dada por estos sistemas comerciales puede no corresponderse con el valor real de R_p , principalmente porque algunos simuladores solares actuales no poseen una resolución suficiente para la determinación de bajos niveles de corriente. En estos equipos comerciales, el método más usado para la determinación de la R_p es el cálculo de la pendiente de la curva corriente-tensión (I-V) en polarización directa cerca de la zona de cortocircuito y en condiciones de iluminación. En esta zona las variaciones en corriente son muy pequeñas, lo que dificulta el cálculo de R_p . Además, a veces pueden existir escalones en la curva que son consecuencia de otros problemas, tales como defectos de soldadura, roturas o *mismatch*, y que contribuyen a aumentar la pendiente y por lo tanto a dar una medida de resistencia paralelo artificialmente menor.

Durante la realización del estudio que se muestra a continuación (ver esquema de la *Figura 2-8*), se fabricaron varios módulos (alrededor de 130), con células comerciales provenientes del mismo suministrador de células y con la misma eficiencia, pero de dos lotes distintos. A pesar de que ambos lotes presentaban la misma eficiencia promedio, la R_p promedio era muy distinta de un lote a otro. Un gran número de células (en torno a 10000) provenientes de ambos lotes fueron medidas y filtradas, rechazando aquellas que presentaban parámetros eléctricos por debajo de un valor umbral. Así se evitan influencias en los resultados de otros factores, tales como células deterioradas, mismatch excesivo, defectos en los contactos eléctricos, etc.


 Figura 2-8. Esquema del procedimiento descrito para el estudio de la R_p

Una vez clasificadas las células, se formaron dos grupos, A y B, de acuerdo al lote de procedencia de las mismas, de manera que los grupos resultantes presentaban la misma R_p que los lotes originales. En este caso el grupo A está formado por células de R_p alta (en torno a 200 Ω) mientras que el grupo B está formado por células de R_p baja (en torno a 40 Ω). Posteriormente las células se introdujeron en un proceso controlado de fabricación de módulos fotovoltaicos. Dicho proceso y materiales pueden ser consultados en Anexo C. Los módulos fabricados fueron medidos y dos de ellos fueron escogidos para su caracterización, uno procedente de cada grupo. La elección de los módulos se hizo de manera aleatoria, después de que estos pasaran todos los controles de calidad implementados en la línea de producción. Se prestó especial atención a los controles de inspección visual, inspección por termografía de infrarrojos (para asegurarse de que no hay puntos calientes, ni roturas, ni defectos de soldadura) y medida de curva I-V (para asegurarse de que la potencia es la prevista y de que la forma de la curva I-V no indica problemas de *mismatch*). Al módulo procedente del grupo A se le denominó MA y al procedente del grupo B, MB. El propósito de este estudio es, por un lado, la correcta determinación de la R_p del módulo y su comparación con la R_p de las células embebidas en el mismo y por otro lado, establecer una relación entre dicha R_p y la potencia o eficiencia del módulo a distintas irradiancias.

Para la caracterización de la R_p del módulo se han empleado y comparado entre sí diferentes técnicas, pudiendo así comparar los resultados de R_p dados por cada una de ellas. Asimismo se propone una técnica novedosa basada en la introducción de una resistencia externa paralela. Posteriormente se mide la curva I-V de cada módulo a distintas irradiancias para obtener la relación de la eficiencia de cada módulo frente a la irradiancia e investigar si existe una relación entre la R_p del módulo y la irradiancia.

Por último se presenta, en la sección 2.4.5, una simulación de generación energética a lo largo de un año de dos instalaciones tipo de 100 KW cada una, obtenida mediante la utilización de un programa de simulación de generación fotovoltaica (PVsyst [57]). Cada instalación está formada con módulos de un grupo y se ha realizado para distintas localizaciones en las que la irradiación es baja. Esto nos permite cuantificar la pérdida de energía generada utilizando módulos con una R_p inferior.

En la fabricación de módulos, los valores elegidos de R_p de célula para definir los grupos A y B han sido tales que representan dos rangos típicos presentes en la industria, uno de valor bajo y otro de valor alto. Sin embargo las células de baja R_p , no presentan una R_p suficientemente baja como para dar lugar a puntos calientes, ya que todas ellas fueron filtradas y toda célula cuya R_p fuera menor a $10\ \Omega$ fue rechazada para este experimento. Por tanto, el estudio de los puntos calientes queda fuera de este trabajo.

El proceso de selección de células y fabricación de módulos viene descrito en el Anexo C. Debido a la dificultad de intervenir en una producción en masa, o posibilidad de roturas en el momento de hacer la soldadura y al número tan elevado de muestras utilizadas, una vez fabricados los módulos, se puede saber de qué grupo proceden las células dentro de cada módulo y por tanto también los promedios y desviaciones estándar de sus parámetros eléctricos. Sin embargo, no es posible conocer la resistencia paralelo individual de cada célula dentro del módulo, dato necesario para la comparación entre la resistencia paralelo de módulo y la resistencia paralelo de las células que lo forman (sección 2.4.3.3). Debido a ello, para medir las R_p individuales de las células de un módulo, se ha procedido según las técnicas de sombreado descritas en la sección 2.2.1.

2.4. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS, MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta sección presenta, en primer lugar, el trabajo realizado sobre las células solares, cómo se han clasificado y de qué manera se obtienen los valores de R_p para células. A continuación se presenta la caracterización de los módulos fotovoltaicos contruidos con las células previamente estudiadas y los diferentes métodos empleados para el cálculo de la R_p en módulos, incluyendo el nuevo método propuesto. Finalmente, con objeto de clarificar las discrepancias entre los distintos métodos y determinar cuál es el método más apropiado para el cálculo de R_p , se hace una comparación de los resultados obtenidos a partir de las medidas de célula y las medidas de módulo.

2.4.1. CÉLULAS SOLARES

2.4.1.1. Descripción y clasificación de las células solares utilizadas

Para este estudio, se han utilizado un total de 11775 células de silicio monocristalino, de 125x125 mm de lado, 165 mm de diagonal y dos colectores (o buses) frontales y dos posteriores (ver *Figura 2-9*).

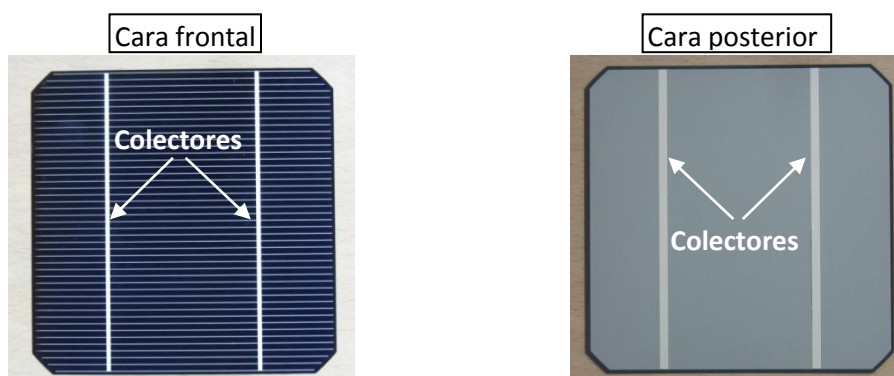


Figura 2-9. Anverso y reverso de una de las células solares monocristalinas utilizadas para este estudio

La eficiencia nominal de la totalidad de las células era de 17,75%, según la clasificación del suministrador, mientras que la eficiencia promedio medida en el *cell tester* descrito

en el Anexo A, fue de 17,40%. Esto supone un 1,9% de diferencia entre ambas medidas, lo que se encuentra dentro del error asumido por el equipo utilizado y la calibración del mismo.

Previamente a su medida eléctrica, se realiza una inspección óptica de las células solares mediante la utilización de una cámara de visión artificial *COGNEX*. La visión artificial es una técnica de reconocimiento de patrones basada en el procesamiento de imágenes tomadas con cámaras de alta resolución. Fruto de esta inspección, se rechazan automáticamente aquellas células que presentan defectos dimensionales, desalineamiento de los buses, manchas en el frontal, roturas o desconchones en el borde. Posteriormente se midió la característica I-V de cada célula en el *cell tester*. La medida del *cell tester* proporciona los parámetros eléctricos de cada célula, y en función de estos se establecieron los límites de aceptación que se muestran en la *Tabla 2-1*. Esta tabla presenta los valores mínimos por debajo de los cuales la célula es rechazada, con la excepción de la resistencia serie, R_s , y la corriente en polarización inversa a -16V, I_{rev} , (columna 4 y 6 de la *Tabla 2-1* respectivamente), para las cuales se impuso un valor límite máximo.

Min. P_m [W]	Min. V_{oc} [V]	Min. I_{sc} [A]	Max. R_s [mΩ]	Min. R_p [Ω]	Max. I_{rev} [A]	Min. FF %
2,61	0,62	5,36	10	10	4	75,2

Tabla 2-1. Valores umbrales de rechazo de los parámetros eléctricos de las células. Cualquier célula que presentase un parámetro eléctrico fuera de los umbrales establecidos fue rechazada para el presente estudio. I_{rev} representa la corriente de la célula cuando esta es polarizada a una tensión de -16V. El resto de parámetros tienen sus significados habituales.

Los filtros de R_p mínima ($R_p > 10 \Omega$) y corriente máxima a -16V ($I_{rev} < 4 \text{ A}$) se han impuesto para minimizar la probabilidad de tener células con la unión *p-n* eléctricamente perforada o con el borde deficientemente aislado (ver sección 2.1).

Como se ha dicho anteriormente, se han utilizado dos grupos de células distintas, grupo A y grupo B. Las células del grupo A presentan, en promedio, una R_p alta, (de 211 Ω según las medidas realizadas en el *cell tester*), mientras que las del grupo B tienen una R_p relativamente baja (de 37 Ω en promedio).

En la *Figura 2-10* se muestra la distribución de la resistencia paralelo para los dos lotes de células. Se puede deducir de la misma que cualquier modulo fabricado con células provenientes del grupo A tendrá una resistencia paralelo significativamente mayor que el fabricado con células provenientes del grupo B. Por otro lado, la potencia promedio de las células de ambos grupos es exactamente la misma (2,68 W, indicada con la línea roja en la *Figura 2-10 b*). La *Tabla 2-2* resume los promedios de los principales parámetros eléctricos de ambos grupos.

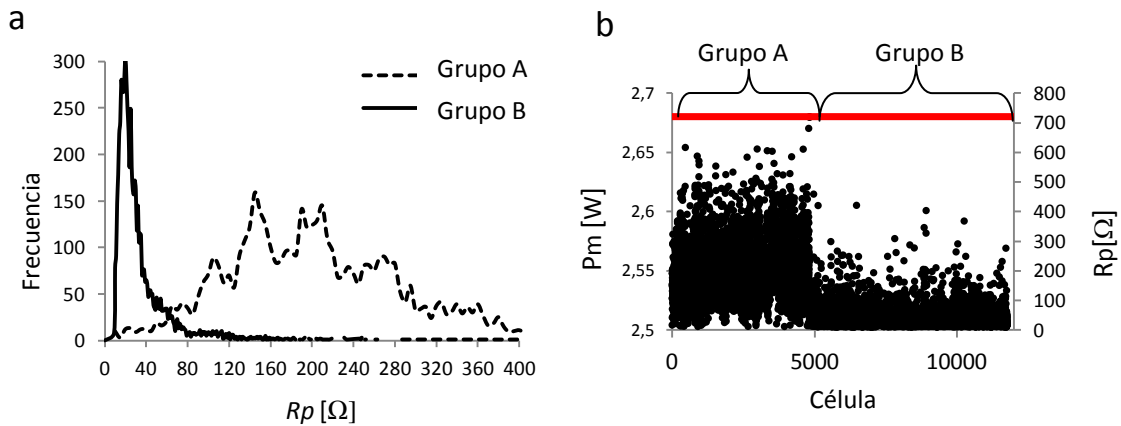


Figura 2-10. a) Gráfica de distribución estadística de la resistencia paralelo de las células de los grupos A y B. b) Medida de resistencia paralelo de cada una de las células de ambos grupos. En rojo se muestra el promedio de potencia de los dos grupos.

Grupo		P_m [W]	V_{oc} [V]	I_{sc} [A]	R_p [Ω]	Eficiencia de célula
B	Promedio	2,68	0,628	5,47	37	0,174
	σ	0,02	0,002	0,04	34	0,001
A	Promedio	2,68	0,628	5,50	211	0,174
	σ	0,01	0,002	0,04	91	0,001

Tabla 2-2. Promedio y desviación estándar de los parámetros eléctricos medidos por el cell tester para células de los grupos A y B

Tras la caracterización, filtrado y clasificación inicial de las células, estas pasaron al proceso de fabricación de módulos.

2.4.1.2. Medida de R_p de células solares en sistemas comerciales.

En los Anexos A y C, se describe el sistema de medida de la empresa Berger Lichttechnik utilizado para realizar este estudio. En dichos anexos se describe, con más profundidad, cómo se realizan las medidas de los parámetros en iluminación. En esta sección, se expondrá con más detalle la medida de la resistencia paralelo de cada célula.

Dentro del *cell tester*, la resistencia paralelo se mide en la misma columna de medida (ver *Figura 8-1*) que el resto de parámetros. Esa columna se encuentra cerrada de manera que no pueda entrar luz desde el exterior. Dos parejas de barras de pines, una frontal y otra posterior, contactan sobre los buses de las células. Una vez conectadas las células, por contacto mecánico, se polariza la célula medida con un voltaje negativo variable. Dicho voltaje se varía automáticamente desde -16V hasta 0V. Esta medida se realiza en oscuridad para evitar contribuciones de la corriente fotogenerada. En la *Figura 2-11* y a modo de ejemplo, se puede ver la curva corriente-tensión (I-V) característica de una de las células medidas.

La curva I-V está compuesta por una serie de parejas de datos I-V generados al aplicar distintos voltajes negativos a la célula. Posteriormente, el software realiza un ajuste lineal de los datos medidos y obtiene el valor de la resistencia paralelo haciendo la inversa de la pendiente de la recta obtenida. Dependiendo del rango de datos utilizado para obtener el ajuste lineal, los valores de R_p obtenidos pueden ser muy distintos. En este caso, el software calcula la R_p haciendo el ajuste lineal de los 10 primeros datos (empezando desde 0V). Estos 10 primeros datos se han representado en rojo en la *Figura 2-11*. El resto de datos obtenidos tras la medida han sido representados en negro. Puede observarse que la distribución de puntos obtenida con este sistema no es homogénea, existiendo una acumulación de datos cerca de cero y una carencia de ellos en voltajes próximos a -2V, es decir, existe una carencia de puntos precisamente en la región en la que el comportamiento de la curva I-V de la célula en polarización inversa se ve más influenciado por la resistencia paralelo. Se ha verificado, en distintos rangos de voltajes, que la utilización del rango de los 10 primeros puntos es la que

ofrece un menor valor de coeficiente de regresión, R^2 , en su ajuste lineal, por lo que este parece ser el motivo de selección de este rango por parte de este sistema comercial.

En la *Figura 2-11* se muestra la R_p y el coeficiente R^2 de dos ajustes lineales, uno realizado sobre todo el conjunto de datos obtenidos (recta de color negro) en el que también están incluidos los puntos en rojo y el otro realizado sobre los diez primeros puntos (recta de color rojo, resultante del ajuste sobre los puntos representados también en rojo). Teniendo en cuenta la colección de puntos utilizada para calcular la R_p (esto es, los diez primeros puntos en polarización inversa), el rango de voltajes típico resultante de dicha selección de puntos es desde 0V hasta aproximadamente -3V.

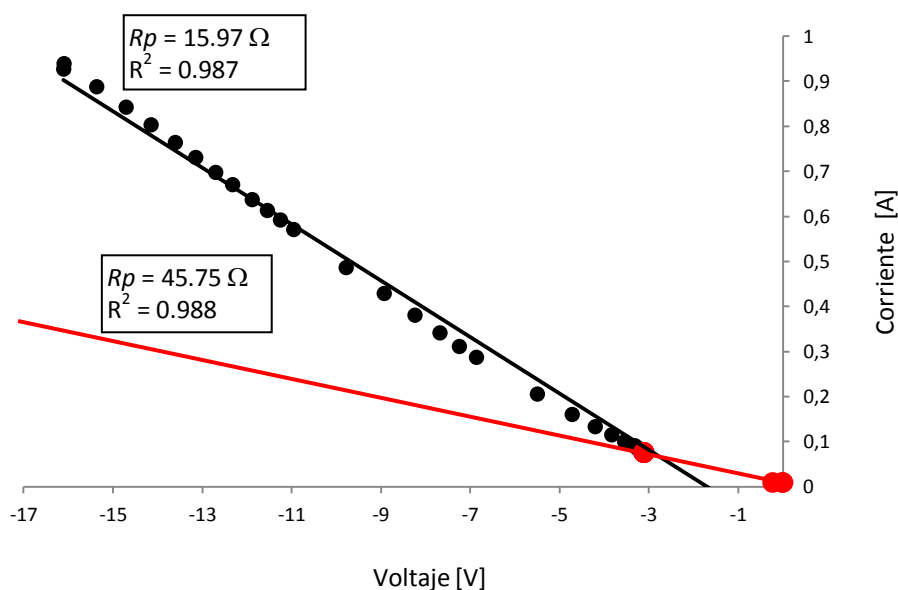


Figura 2-11. Conjunto de valores I-V obtenidos por sistemas comerciales de medición de células solares. Las medidas se han realizado en oscuridad y polarización inversa. La línea negra representa la recta obtenida resultante de la regresión lineal de todos los pares I-V obtenidos al polarizar la célula a tensiones negativas. La línea roja representa la recta obtenida mediante regresión lineal de los 10 primeros pares I-V (puntos en rojo) de tensiones negativas comenzando en $V=0$.

2.4.2. MODULOS FOTOVOLTAICOS

2.4.2.1. Fabricación de los módulos fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos fueron fabricados utilizando los grupos de células A y B. Estas células habían sido previamente caracterizadas y clasificadas. Se fabricaron alrededor de 130 módulos con células provenientes de ambos grupos, pero sin mezclar, de manera que existe un grupo de módulos construido únicamente con células del grupo A, y otro grupo de módulos construido únicamente con células del grupo B. Hay que tener en cuenta que la principal diferencia entre ambos grupos es el rango de su R_p , ya que el resto de parámetros, tal y como se mostraba en la *Tabla 2-2*, es muy similar. El proceso de fabricación se describe más detalladamente en el Anexo C.

La configuración de los módulos es de 6x12 (6 tiras de células de 12 células cada una), con todas las células conectadas en serie. La potencia nominal de los módulos es de 190W (ver *Figura 2-12*). Cada módulo cuenta con 3 diodos de paso en su caja de conexiones, según una de las configuraciones estándar de este tipo de módulos a nivel comercial. Estos diodos de paso tuvieron que ser desconectados para realizar alguna de las medidas especificadas en este estudio.

Todos los módulos fabricados fueron pasados por los controles de calidad habituales de la línea de fabricación, que son: medidas de termografía infrarroja, inspección visual, medidas de voltaje a baja irradiancia, medida de la característica I-V (*flash tester*), etc. Todos aquellos que presentaban algún problema fueron descartados del estudio.

De todos los módulos válidos, se cogió un módulo fabricado con células del grupo A, módulo que llamaremos MA y otro módulo fabricado con células del grupo B, módulo MB. Ambos módulos fueron utilizados para su posterior caracterización.



Figura 2-12. Módulo FV muestra fabricado para el estudio y determinación de la R_p en módulos. Consta de 72 células y una potencia de 190W.

2.4.2.2. Caracterización de los módulos fotovoltaicos

Medidas en equipos comerciales

Al igual que las células, los módulos se midieron con sistemas comerciales convencionales para su posterior comparación con los resultados de las medidas específicas realizadas en este estudio. Se utilizaron dos equipos comerciales diferentes con objeto de ampliar el conjunto de datos medidos y poder contrastar resultados. Ambos son simuladores solares tipo *flash*, uno de ellos un *Berger Flash Tester* con una carga pulsada PSL8 y el otro un *Pasan SunSim3c*. Los dos cuentan con una clasificación AAA, de acuerdo con la norma IEC 60904-9 [58]. Las condiciones de medida son $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ de temperatura de módulo e irradiancia de $1000\text{ W/m}^2 \pm 5\%$. La temperatura del módulo se mide por medio de un sensor de infrarrojos situado en la parte posterior del mismo. Un detector de temperatura se encuentra en las proximidades del módulo para registrar la temperatura ambiente.

Antes de su medida, los módulos fueron estabilizados a 25 °C de temperatura. Para evitar su calentamiento durante la medida, esta se hace durante un pulso de luz muy breve, de unos 10 milisegundos, en los cuales la fuente de luz es suficientemente estable para realizar una medida fiable. Durante ese periodo de tiempo la curva I-V del

módulo medido se genera por medio de una carga variable y un multímetro que recoge los datos de corriente y tensión. Ambos sistemas realizan la medida de la misma forma, estando representados en la *Figura 2-13*.

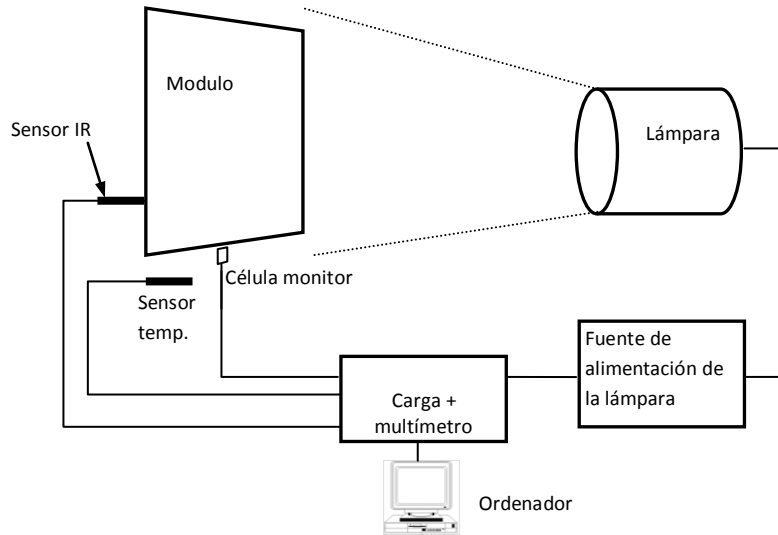


Figura 2-13. Esquema de conexionado del simulador solar comercial para medida de módulos FV. Los dos simuladores solares comerciales utilizados se encuentran representados por el mismo esquema.

Los resultados obtenidos tras la medida de la curva I-V de los módulos, mostraron coherencia con los obtenidos en la caracterización previa de las células. Esto es, los parámetros eléctricos de ambos módulos eran muy similares, a excepción de los valores de R_p , que resultaron aproximadamente el doble para el módulo MA que para el MB (ver *Tabla 2-3*). La misma tendencia se obtuvo con los dos sistemas de medidas, aunque con ligeras discrepancias en los valores absolutos, como puede observarse en la *Tabla 2-3*.

Sistema	Módulo	$P_m [W]$	$I_{sc} [A]$	$V_{oc} [V]$	$R_p [\Omega]$
Berger	MB	190,1	5,55	45,11	470
	MA	190,8	5,51	45,03	887
Pasan	MB	188,6	5,58	44,91	349
	MA	189,1	5,55	44,93	834

Tabla 2-3. Resultados de la medida de ambos módulos dada por los dos simuladores solares, Berger y Pasan. La R_p que figura en la tabla es la dada por el propio equipo de medida.

El método utilizado por ambos sistemas comerciales para el cálculo de la R_p de módulos consiste en obtener la inversa de la pendiente de la curva I-V en condiciones estándar de medida y con el módulo polarizado en directa. Dependiendo del sistema usado, los rangos de voltaje utilizados para hacer el ajuste lineal de la curva I-V son diferentes.

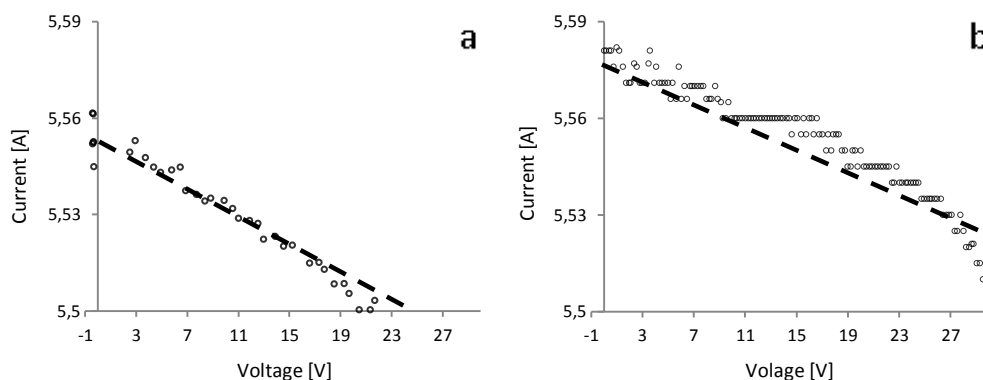


Figura 2-14. Gráfica I-V del módulo MB dada por los dos simuladores solares comerciales. La gráfica ha sido aumentada en torno a I_{sc} . a) Sistema Berger, b) sistema Pasan.

En las gráficas de la Figura 2-14, aparece representada una parte de las curvas I-V del mismo módulo (MB) y el rango de voltajes utilizado por cada sistema para hacer el ajuste lineal del cual se obtiene la R_p . Los coeficientes de regresión (R^2) obtenidos mediante estos ajustes son típicamente de 0,85 llegando a obtener incluso valores de 0,6. La resolución en corriente de los equipos de medida, hace suponer que los valores de R_p obtenidos a partir de medidas de curvas I-V en iluminación con estos equipos comerciales, debe tomarse con ciertas precauciones.

Determinación de la R_p del módulo en oscuridad y polarización inversa.

Para determinar parámetros como la resistencia serie R_s , el factor de idealidad del diodo A , la resistencia paralelo R_p y las corrientes de saturación, la medida eléctrica en condiciones de oscuridad es más sensible que la medida en condiciones de iluminación [50].

Para estas medidas de los módulos se ha contado con la participación del laboratorio de calibración de células solares del CIEMAT. El sistema de medición de células solares, que ha sido utilizado en otras publicaciones [59] [60], ha sido adaptado para la medida de módulos fotovoltaicos. Este sistema de medida viene representado en la *Figura 2-15*.

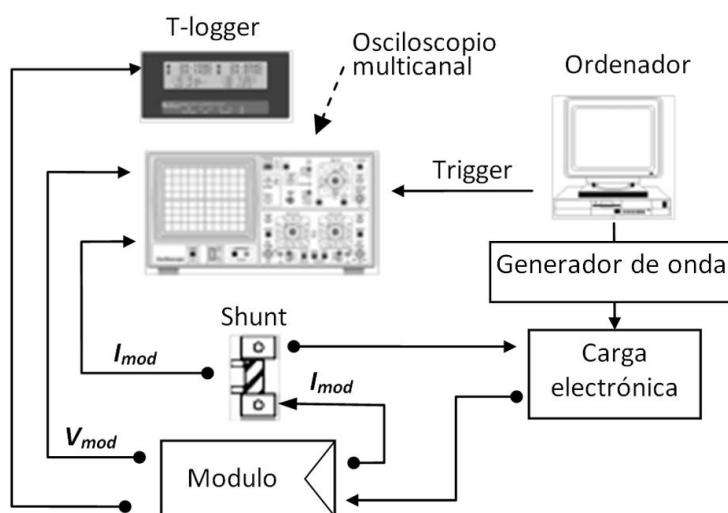


Figura 2-15. Esquema del sistema de medición de laboratorio de calibración de células solares del CIEMAT

Debido a que la medida se hace en polarización inversa, los diodos de protección (o de paso) presentes en la caja de conexiones se activarían, puenteando las células y haciendo que toda la corriente pase por ellos. Por este motivo, los diodos fueron extraídos de los módulos. En esta propuesta de medida, la temperatura del módulo se obtiene por medio de un termopar en contacto con la lámina posterior del módulo y cuya lectura se hace a través de un registrador de temperatura o T-logger. La medida se controla automáticamente por ordenador gracias a un software de control desarrollado internamente en el laboratorio de calibración de células solares del CIEMAT. Durante el intervalo de medida, el software controla un generador de onda de tensión que es capaz de generar tanto una rampa como una onda sinusoidal. La señal es amplificada por una carga electrónica (que puede trabajar como un amplificador de corriente o como un amplificador de voltaje) y es aplicada al módulo fotovoltaico que se está midiendo. La corriente y el voltaje generados por el módulo

son medidos de forma sincronizada, mediante un esquema de cuatro terminales, utilizando un osciloscopio, cuyo disparo es activado por el propio generador de onda. En cada medida, el propio osciloscopio toma y promedia 4 curvas I-V. Durante la medida se aplicó al módulo un voltaje negativo de hasta 10V dando lugar a las curvas representadas en la *Figura 2-16*.

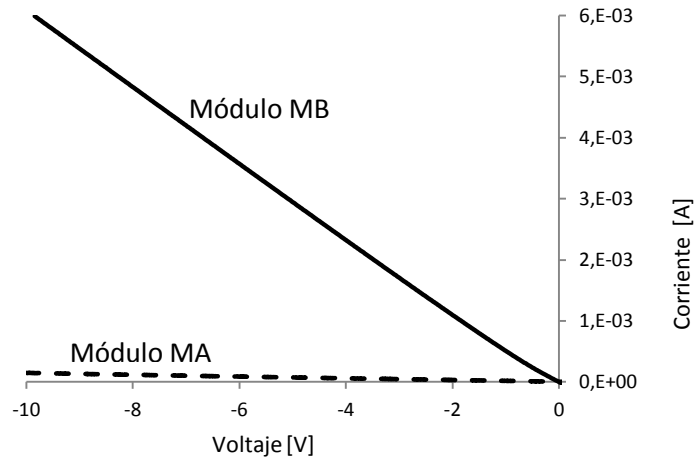


Figura 2-16. Gráfica de corriente I-V medida con el sistema descrito en la figura 2-16. Las medidas se han realizado en condiciones de oscuridad y en polarización inversa para los módulos MA y MB.

Es evidente, en la *Figura 2-16*, la diferencia entre las pendiente de las curvas I-V pertenecientes a los módulos MA y MB. Para el cálculo de la pendiente de las curvas representadas y con el fin de evaluar la influencia del rango de voltaje utilizado, el ajuste se ha realizado cogiendo los puntos comprendidos en distintos rangos de voltajes, desde 0 a -2V hasta 0 a -10V.

Se ha hecho un ajuste lineal y polinomial de segundo grado de las curvas. Para el caso de un ajuste lineal, como valor de R_p se ha tomado la inversa de la pendiente de la recta obtenida. Para el caso de un ajuste polinomial de segundo orden, la resistencia paralelo ha sido calculada como:

$$R_p = \frac{1}{\left| \frac{dI(V)}{dV} \right|_{V=0}}, \quad (2.16)$$

siendo $I(V)$ la corriente como función del voltaje con una dependencia de grado 2 (según ha sido definido en la ecuación (2.12)). En la *Figura 2-17* se observan los valores de R_p obtenidos mediante esta técnica para distintos rangos de voltaje y para los dos ajustes, polinomial y lineal.

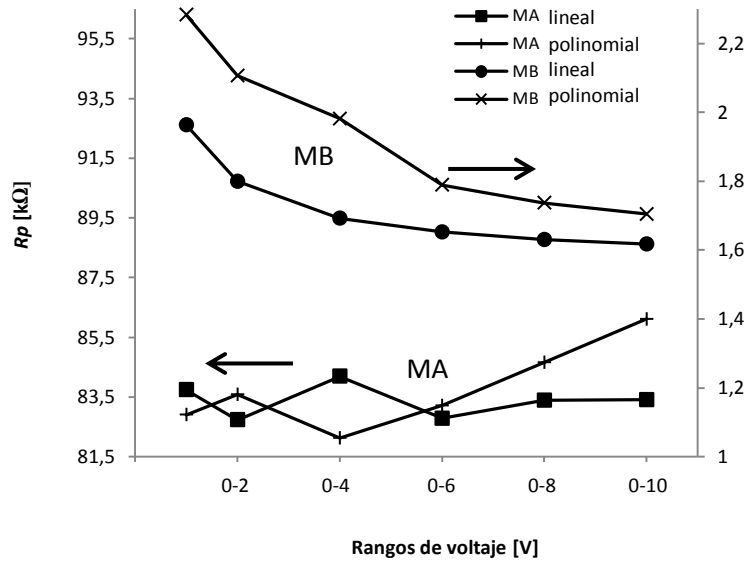


Figura 2-17. Valores de R_p obtenidos por el método de polarización inversa y en condiciones de oscuridad mediante ajustes polinomial y lineal para los módulos MA y MB. Los ajustes se han realizado a distintos rangos de voltaje (eje de abscisas).

Para el modulo MB se puede observar, en la *Figura 2-17*, una clara tendencia de la R_p con el rango de voltaje seleccionado. La resistencia paralelo decrece según aumenta el rango de voltaje elegido para calcular la pendiente, llegando a los valores más bajos para el rango de 0 a -10V voltios. Sin embargo, esa tendencia no ha sido detectada para el modulo MA.

La *Tabla 2-4* muestra los valores de R_p obtenidos para los dos módulos y cada rango de tensión utilizado. Se ha incluido también la Desviación Estándar Relativa (DER), la cual refleja las variaciones relativas de la resistencia paralelo según sea el rango elegido para calcularla. Los coeficientes de regresión R^2 (columnas 4 y 6), aportan información acerca del comportamiento de la curva ajustada. Para el caso del módulo MA, el

ajuste lineal es ligeramente mejor que el polinomial, mientras que para el módulo MB el comportamiento es el opuesto. Esto puede explicarse en términos del parámetro de ajuste c , (Ecuación (2.12)), que es responsable del comportamiento cuadrático de la curva I-V en polarización inversa. En las medidas realizadas, c ha dado valores mucho menores (entre 100 y 1000 veces menores) para el módulo MA que para el módulo MB, haciendo que la curva I-V sea más similar a una recta que a una parábola y que, por tanto, el cálculo de la pendiente no dependa del rango elegido del eje x (rango de voltaje).

Por otro lado, la DER calculada para el módulo MB es más alta, lo que quiere decir que, el cálculo de R_p por éste método es fuertemente dependiente del rango de voltaje elegido para hacer el ajuste, independientemente de si el ajuste es lineal o polinomial. Además, se hace evidente la gran discrepancia existente entre las resistencias en paralelo obtenidas por este método con las obtenidas en iluminación a partir de la curva I-V con simuladores solares comerciales, en los cuales se han medido valores hasta dos órdenes de magnitud inferiores.

Modulo	Rango de voltaje [V]	R_p [Ω]		R_p [Ω]	
		Lineal	R^2	Polinomial	R^2
MA	-10→0	83404	0,9999	86107	0,9998
	-8→0	83387	0,9999	84656	0,9998
	-6→0	82780	0,9997	83209	0,9998
	-4→0	84194	0,9995	82124	0,9995
	-2→0	82734	0,9982	83582	0,9981
	-1→0	83742	0,9933	82905	0,9930
	Promedio DER%	83373 0,67		83764 3,38	
MB	-10→0	1617	0,9998	1704	0,9999
	-8→0	1630	0,9997	1737	0,9999
	-6→0	1652	0,9995	1789	0,9999
	-4→0	1692	0,9992	1981	0,9999
	-2→0	1799	0,9985	2106	0,9999
	-1→0	1963	0,9986	2283	0,9999
	Promedio DER%	1726 7,71		1933 23,8	

Tabla 2-4. Resumen de resultados de resistencia paralelo obtenida por el método de ajuste, polinomial y lineal, a partir de los datos de la curva del módulo en condiciones de polarización inversa y oscuridad. Para el ajuste se han tenido en cuenta los distintos rangos de voltaje que aparecen en la tabla.

En otras referencias [61], se ha realizado un modelado matemático del comportamiento en inversa del módulo mediante la utilización del modelo de un diodo (ecuación (2.1)). Partiendo de la ecuación (2.1) y considerando voltajes suficientemente negativos, el término exponencial se aproxima a cero y el modelo establece una relación lineal entre corriente y voltaje:

$$I \cong I_L - \frac{V + IR_s}{R_p} = \frac{1}{R_p + R_s} (I_L R_p - V) \quad (2.17)$$

En condiciones de oscuridad, $I_L = 0$, la ecuación anterior queda:

$$\frac{-V}{I} \cong (R_p + R_s) \quad (2.18)$$

Por otro lado, se puede obtener la pendiente de la curva dada por el modelo de 2 diodos (ecuación (2.10)), haciendo la derivada para un voltaje dado (dI/dV). En condiciones de oscuridad y asumiendo, otra vez, que los términos exponenciales se pueden despreciar para voltajes suficientemente negativos, se llega a:

$$\frac{-dV}{dI} \cong (R_p + R_s) \quad (2.19)$$

Por tanto, de la ecuación (2.19), en el rango de tensiones negativas y bajo la asunción de que los términos exponenciales se aproximan a cero y despreciando la R_s frente a R_p , se obtiene que $R_p = -dV/dI$, lo que es equivalente a la ecuación (2.16) usada para calcular la resistencia paralelo en el ajuste polinomial. Balenzategui *et al.* [61], realizaron diferentes simulaciones para cuantificar el error que se asume al despreciar los términos exponenciales en la ecuación de un diodo (2.1). En dichas simulaciones se representa tanto $-\frac{dV}{dI}(V)$ como $-\frac{V}{I}(V)$ sin despreciar el término exponencial y están basadas en el modelado de la ecuación de un diodo por los métodos de Newton-Raphson y de Lambert W, dando lugar, en ambos métodos, a los mismos resultados. El

error se define como la diferencia normalizada entre la R_p obtenida utilizando dichas simulaciones y la R_p obtenida por (2.18) para el caso $-\frac{V}{I}(V)$ y (2.19) para el caso $-\frac{dV}{dI}(V)$. Al introducir los parámetros típicos de los módulos de muestra en cuestión, se llega a un error máximo de 0,3%, el cual se produce cuando se calcula R_p en $V=0$. También se ha observado, que el cálculo de R_p en condiciones de irradiancia de 1000W/m^2 da lugar, a un error máximo de 2% (utilizando los mismos parámetros de los módulos de muestra y en $V=0$). Estos resultados están basados en el modelo de un diodo y no tienen en cuenta otras contribuciones a la corriente, tales como la disrupción, efectos multiplicativos, etc., por lo que no describen de una manera apropiada el comportamiento de la curva I-V en condiciones de polarización en inversa, cuando dichos fenómenos comienzan a tener importancia.

Dada la dispersión de los valores de R_p obtenidos en la *Tabla 2-4*, la influencia del rango de voltaje elegido para hacer el ajuste y las discrepancias entre los valores obtenidos mediante el cálculo de R_p en oscuridad y los datos de R_p ofrecidos por los simuladores comerciales en iluminación, se propone, en esta tesis, un nuevo método experimental, el cual está basado en la utilización de una resistencia externa paralela al módulo a medir.

2.4.2.3. Propuesta de método de medida de R_p en módulos

Como se ha visto en la sección 2.4.2.2, el dato de R_p obtenido es dependiente del tramo de la curva I-V utilizado para realizar el ajuste, especialmente para el módulo con menor R_p (módulo MB). Para evitar esta variabilidad, se propone un nuevo método consistente en el uso de una resistencia paralelo externa y que no requiere ningún tipo de ajuste. La idea de utilizar una resistencia externa para estimar los parámetros de las células solares no es nueva. Por ejemplo, esta ha sido usada para el análisis cuantitativo de las derivaciones (“*shunts*”) por medio del análisis de fotoluminiscencia en células solares [62], o para la evaluación de la fiabilidad de los métodos de ajuste utilizados en los modelos de células solares [63].

Este método está basado en el esquema de la *Figura 2-18*. Si se conecta una resistencia externa en paralelo a una célula solar, la curva I-V de la célula se ve modificada de acuerdo a la siguiente expresión (utilizando el modelo de un diodo):

$$\begin{aligned}
 I &= I_L - I_D - I_p - I_E = \\
 &= I_L - I_s \left(\exp \frac{V + (I + I_E)R_s}{AV_T} - 1 \right) - \frac{V + (I + I_E)R_s}{R_p} - \frac{V}{R_E} = \\
 &= I_L - I_s \left(\exp \frac{V(1 + R_s/R_E) + IR_s}{AV_T} - 1 \right) - \frac{IR_s}{R_p} - V \left(\frac{1}{R_E} + \frac{1}{R_p} \left(1 + \frac{R_s}{R_E} \right) \right),
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

donde I_D es la corriente del diodo, I_p es la corriente que atraviesa la resistencia paralelo interna de la célula e I_E representa la corriente que pasa por la resistencia externa paralela a la célula. Como la resistencia externa (R_E) se encuentra físicamente conectada al circuito externo, el voltaje entre sus terminales es igual al voltaje de salida de la célula, que a su vez, es el voltaje medido en el dispositivo de medida. Por tanto, la corriente que pasa por R_E es: $I_E = V/R_E$.

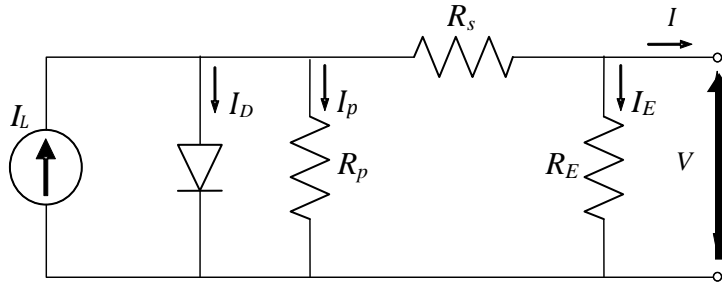


Figura 2-18. Esquema eléctrico de la aplicación del método de resistencia externa

Si la resistencia externa es considerada muy grande en comparación con la resistencia serie interna, se puede asumir que $R_s/R_E \rightarrow 0$ y, entonces:

$$I = I_L - I_s \left(\exp \frac{V + IR_s}{AV_T} - 1 \right) - \frac{IR_s}{R_p} - V \left(\frac{1}{R_E} + \frac{1}{R_p} \right) \tag{2.21}$$

El último término equivale a la resistencia paralelo interna, R_p , conectada en paralelo con la resistencia externa, R_E , dando lugar a la resistencia paralelo equivalente (R_{Pe}):

$$\frac{1}{R_{Pe}} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_E} = \frac{R_p + R_E}{R_p R_E} \quad (2.22)$$

Resultando, la ecuación (2.21), como sigue:

$$I = I_L - I_s \left(\exp \frac{V + IR_s}{AV_T} - 1 \right) - \frac{IR_s}{R_p} - \frac{V}{R_{Pe}} \quad (2.23)$$

Extrapolando estos resultados a un módulo, para voltajes negativos suficientemente altos, se puede despreciar el término entre paréntesis (el error cometido al hacer estas aproximaciones es de un 0,3%, tal y como se ha comentado en la sección anterior). Si las medidas se hacen es oscuridad, la corriente fotogenerada, I_L , será igual a cero. Así, se obtiene:

$$I \cong -\frac{IR_s}{R_p} - \frac{V}{R_{Pe}} \quad \rightarrow \quad I \cong -\frac{V}{R_p + R_s} \cdot \frac{R_p + R_E}{R_E} \quad (2.24)$$

Asumiendo finalmente que R_s se puede despreciar en comparación con la resistencia R_p , se obtiene la expresión (2.25), representada en la *Figura 2-19*.

$$I \approx -V \frac{R_p + R_E}{R_p R_E} = -\frac{V}{R_{Pe}} \quad (2.25)$$

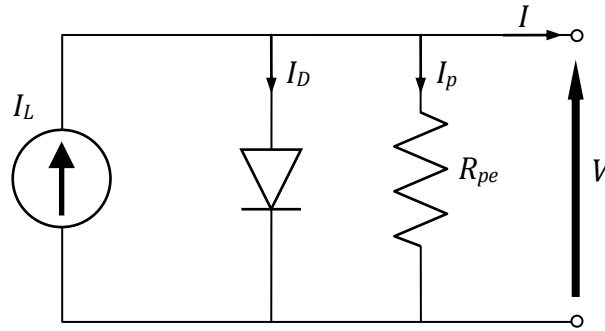


Figura 2-19. Simplificación del esquema del método de la resistencia externa (Figura 2-18) considerando la resistencia en paralelo equivalente R_{pe} y despreciando la resistencia serie

Comparando la expresión (2.25) con la que se obtiene sin resistencia externa, tal y como se describe en (2.18), y despreciando la resistencia serie, se obtiene:

$$I \approx -\frac{V}{R_p} \equiv I_R \quad , \quad (2.26)$$

donde I_R es la corriente medida entre los terminales externos cuando no hay resistencia externa y será referida como la *corriente de referencia* o *nivel de referencia*. Si, a continuación, se conecta al módulo fotovoltaico una resistencia externa de igual valor que la resistencia paralelo del módulo, $R_E = R_p$, se llega a la siguiente relación:

$$R_{pe} = \frac{R_p}{2} \quad \rightarrow \quad I \approx -\frac{V}{R_{pe}} = -2\frac{V}{R_p} = 2I_R \quad (2.27)$$

De la misma forma, para $R_E = 2 \cdot R_p$, se tiene $I = (3/2)I_R$, y así sucesivamente. En general, para z , siendo z un valor real positivo (entero o fracción) se llega a:

$$\begin{aligned}
 R_E = zR_p &\quad \rightarrow \quad R_{pe} = \frac{R_p R_E}{R_p + R_E} = \frac{z}{z+1} R_p \rightarrow \\
 &\quad \rightarrow \quad I \approx - \frac{z+1}{z} \cdot \frac{V}{R_p} = \frac{z+1}{z} \cdot I_R
 \end{aligned}
 \tag{2.28}$$

Por tanto, cuando la resistencia externa es muy elevada (o ausencia de resistencia externa), la corriente medida, a un determinado voltaje, será la corriente de referencia ($I \rightarrow I_R$), mientras que para pequeños valores de R_E (menores que R_p), la corriente aumenta de acuerdo con la expresión (2.28). Esto se ha representado en la *Figura 2-20a* para tres voltajes distintos y con los valores de I_L , R_p , R_s , T , A , e I_s especificados en el pie de la figura.

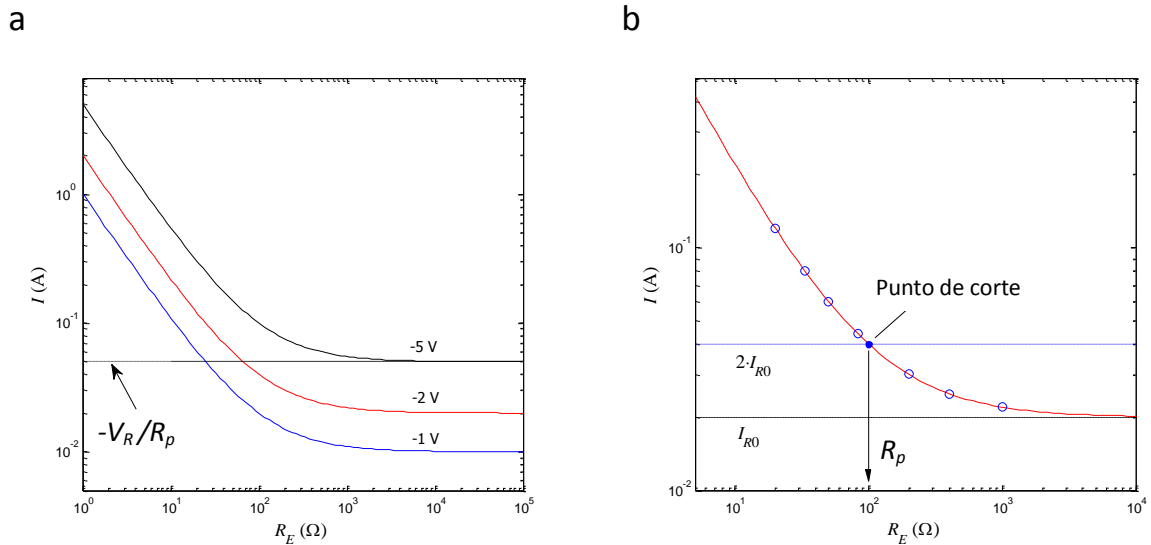


Figura 2-20. Corriente de salida del módulo fotovoltaico cuando una resistencia externa variable se conecta en paralelo a los terminales del mismo. El valor $I_{R0} = -V_R / R_p$ es el nivel de referencia para $V = -5V$ cuando la resistencia externa es $R_E = \infty$ (no hay resistencia externa); b) esquema del método de determinación de la resistencia paralelo del módulo R_p . Los puntos huecos representan la corriente medida, para un determinado voltaje, según se varía la resistencia externa. Los parámetros de simulación introducidos en la ecuación (2.20) son: $I_L = 0$ (oscuridad), $R_p = 100 \Omega$, $R_s = 10 \text{ m}\Omega$, $T = 300 \text{ K}$, $A = 1,5$, $I_s = 1.0 \times 10^{-8} \text{ A}$.

De acuerdo al principio desarrollado anteriormente, se ha diseñado un nuevo método para la determinación de la resistencia paralelo o *shunt* del módulo fotovoltaico. Este método se resume en:

- a) Se mide la curva I-V del módulo fotovoltaico en condiciones de oscuridad y sin resistencia externa. El módulo es medido, a tensiones negativas, en un rango determinado de voltajes. Esta medida no puede realizarse si existen diodos de paso, por lo que, para su futura implementación en línea, esta medida ha de realizarse en un puesto anterior a la colocación de la caja de conexiones, donde se encuentran dichos diodos.
- b) Para un voltaje fijado, que se define como V_R , se extrae el valor de la *corriente de referencia*, I_{R0} .
- c) Entonces, se conecta en paralelo a los terminales del módulo fotovoltaico un resistor externo calibrado R_E , de un valor conocido y menor que $-V_R / I_{R0}$. En esta disposición se vuelve a medir la curva I-V. Al mismo voltaje de referencia V_R , se obtiene un segundo valor de la corriente que se denomina I_{R2} que, de acuerdo a las ecuaciones (2.25) y (2.26), se relaciona con el *nivel de referencia* I_{R0} por medio de la siguiente ecuación:

$$V_R = -I_{R0}R_p = -I_{R2}R_{pe} = -I_{R2} \frac{R_p R_E}{R_p + R_E} \quad (2.29)$$

y de la identidad anterior se obtiene:

$$\frac{I_{R0}}{I_{R2}} = \frac{R_E}{R_p + R_E} \quad \rightarrow \quad R_p = \left(\frac{I_{R2}}{I_{R0}} - 1 \right) R_E \quad (2.30)$$

Por tanto, la resistencia paralelo interna del módulo, R_p , puede obtenerse mediante el cálculo de la variación relativa de la corriente medida en los terminales del módulo a un voltaje de referencia determinado, cuando se añade una resistencia externa conocida en paralelo con el módulo.

Una cuestión importante a la hora de aplicar el método descrito es que la resistencia externa R_E , debe ser suficientemente baja para que su influencia sea detectada en la curva I-V y que las variaciones entre los valores I_{R2} y I_{R0} puedan medirse. Sin embargo, la determinación de la corriente medida en los terminales del módulo, y por consiguiente la pendiente de la curva I-V, se ven afectados por la baja resolución del convertidor analógico/digital. Por tanto se deben realizar varias pruebas con distintos resistores para elegir el más adecuado, de acuerdo a las características del módulo que se va a medir. Por este motivo, se ha investigado una ligera variación del método descrito anteriormente. Esta consiste en la utilización de un conjunto de valores de I obtenidos aplicando, en paralelo al módulo, distintas resistencias externas (R_E) y midiendo la curva I-V con cada una de las resistencias. El conjunto de resistencias externas elegido tendrá valores superiores e inferiores a V_R/I_{R0} , de manera que se puede representar una gráfica de I frente a R_E cuya forma debe reproducir la representada en la *Figura 2-20a*. Cuando esta curva corta el valor $2 \cdot I_{R0}$, la resistencia R_E correspondiente es igual que la resistencia paralelo interna del módulo, tal y como se ha representado en la *Figura 2-20b*.

Por otro lado, una vez que se han medido las curvas I-V para cada R_E , se repite el procedimiento para distintos valores de referencia de voltaje V_R , y si el método se aplica correctamente, se obtendrán valores coincidentes de R_p para cada V_R elegido.

Finalmente, este método (en sus dos variantes) puede ser aplicado en el caso de que la curva I-V no siga un comportamiento lineal, como es el caso de la ecuación (2.12) debido a que el parámetro c es independiente de las derivaciones y de la resistencia externa.

Los módulos MA y MB fueron medidos según el método descrito anteriormente. Así, fueron obtenidas varias curvas para distintos valores de resistencia externa. Para cada

curva I-V se midió la corriente a un determinado voltaje (los voltajes de referencia utilizados van desde -0,5V hasta -8V). En las siguientes gráficas (Figura 2-21) se muestran los resultados obtenidos. En las Figura 2-21 a y c, se ha representado la corriente I en función de la resistencia paralelo externa, R_E . Para facilitar la legibilidad de la gráfica, tan solo se han representado dos voltajes de referencia (-1V y -4V) de los nueve utilizados. Las líneas horizontales representan el valor $2 \cdot I_R$ para los dos voltajes de referencia elegidos V_R . El valor de resistencia externa R_E para el cual la recta $2 \cdot I_R$ corta la curva I- R_E es aquel que cumple $I=2 \cdot I_{R0}$ y por tanto $R_p = R_E$.

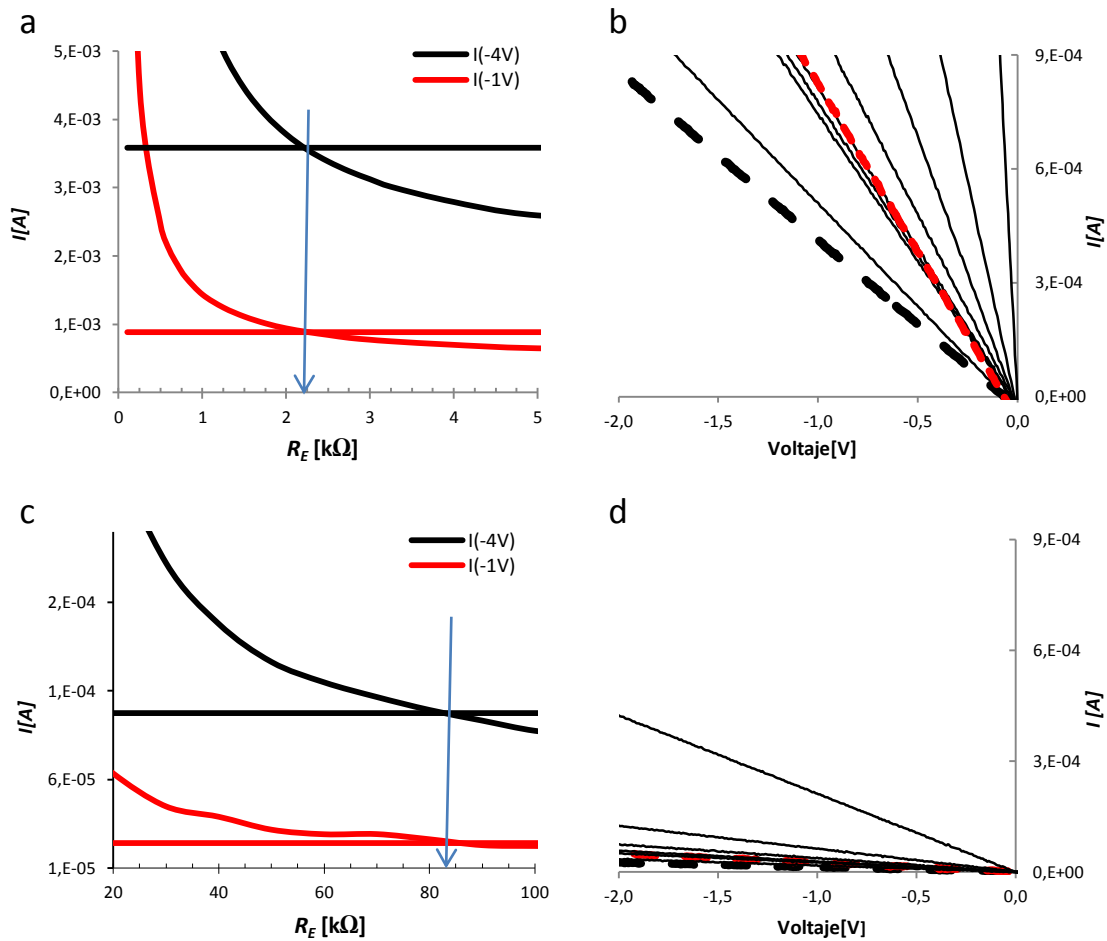


Figura 2-21. a) y c) corresponden a los valores de la corriente medida en los bornes del sistema en función de la resistencia externa. Las rectas horizontales se corresponden con el doble de la corriente de referencia ($2 \cdot I_{R0}$). En el punto de corte de ambas curvas se obtiene el valor de la R_p . b) y d) representan las curvas I-V en polarización inversa y en oscuridad de los módulos medidos para distintos valores de resistencia externa (R_E). Las rectas rojas son aquellas para las que $R_p = R_E$, mientras que las rectas gruesas negras son aquellas para las que $R_E = \infty$. a) y b) pertenecen al módulo MB y c) y d) al módulo MA.

Por otro lado, la *Figura 2-21 b y d*, muestra las curvas I-V de los módulos a polarización inversa y en oscuridad para distintos valores de resistencia externa R_E . Se ha representado también la curva para $R_E = \infty$, es decir, en ausencia de resistencia externa (línea discontinua y negra) y para $R_E = R_p$ (línea discontinua roja).

Los resultados obtenidos por esta variante del método son recogidos en la *Tabla 2-5*. Se ha calculado la R_p para distintos valores de voltaje de referencia, desde -0,5V hasta -8V.

Voltaje de referencia [V]	R_p MB [Ω]	R_p MA [Ω]
-8	2255	82550
-7	2205	82850
-6	2205	85000
-5	2215	85800
-4	2215	82650
-3	2240	83300
-2	2260	79500
-1	2245	85350
-0,5	2285	87000
Promedio	2236	83778
DER %	1,2	2,7

Tabla 2-5. Valores de resistencia paralelo obtenidos mediante el método de resistencia externa para distintos valores de voltaje. El promedio y la desviación estándar relativa al promedio (DER) de la resistencia paralelo figuran al final de la tabla.

Si comparamos los resultados obtenidos por el método de la resistencia externa con los obtenidos por el cálculo de la pendiente (descrito en la sección 2.4.2.2), se puede ver que, para el módulo MA, estos concuerdan muy bien. Sin embargo, para el módulo MB, el promedio de R_p obtenido por el método de resistencia externa es aproximadamente un 29% mayor que el obtenido por el método de cálculo de pendiente con ajuste polinomial. La *Tabla 2-6* presenta los valores obtenidos de R_p para los módulo MA y MB por medio de todas las técnicas utilizadas en este trabajo.

Modulo	Promedio de R_p de célula medida por cell tester	R_p de módulo medida por Pasan	R_p de módulo medida por Berger	Ajuste polinomial	Ajuste lineal	Método de resistencia externa
MA, R_p [Ω]	211	834	887	83373	83764	83778
MB, R_p [Ω]	37	349	470	1726	1933	2236

Tabla 2-6. Resumen de las R_p obtenidas por los distintos métodos estudiados en este capítulo

Para el caso de los sistemas comerciales Berger y Pasan, las medidas de R_p se han realizado en condiciones de iluminación a 1000 W/m^2 , dando valores muy inferiores a los obtenidos con otros métodos. Así, para el módulo con una R_p alta, los sistemas comerciales dan valores hasta dos órdenes de magnitud inferiores a los obtenidos por otras técnicas en las que las medidas se hacen en oscuridad (ver columnas 5, 6 y 7 de la tabla *Tabla 2-6*). Para el caso de un módulo con R_p relativamente baja, como es el módulo MB, los sistemas comerciales subestiman la R_p en un factor entre 4 y 6 aproximadamente. Varios autores han abordado la influencia de la irradiancia sobre la R_p [52] [53], lo que podría justificar estas variaciones. Sin embargo, como se comentará en la sección 2.4.4, esa dependencia no es clara, existiendo algún otro trabajo que no la detecta [30].

En la siguiente sección se profundizará aún más en la correcta caracterización de la resistencia paralelo de un módulo. Así, se determinarán los valores correctos de R_p para los módulos fabricados en este trabajo. Para ello se abordará el cálculo de la R_p del módulo mediante la obtención de la R_p de las células que lo conforman y posteriormente se aplicará el modelo de asociación de dispositivos fotovoltaicos [5].

2.4.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE CÉLULA Y MÓDULOS

2.4.3.1. Modelo de asociación

Con objeto de comparar la R_p del módulo medida por el método descrito en la sección 2.4.2.3 y las R_p de las células por separado, se utilizará, en esta sección, el modelo de asociación desarrollado por M. C. Alonso-García [5]. Se aplicará el método de asociación para calcular la R_p teórica del módulo a partir de las R_p individuales de las células que lo conforman.

En el modelo de asociación propuesto en [5], el punto de partida para obtener los parámetros de la asociación de células es la utilización de los parámetros de los modelos individuales (células) para la obtención de los parámetros de la asociación (módulo) sin necesidad de disponer de la curva I-V completa de cada módulo.

Debido a que las células de los módulos utilizados en esta tesis están conectadas en serie, se utilizará el modelo de asociación en serie. En la referencia [5], se distingue entre el comportamiento del dispositivo fotovoltaico en polarización directa e inversa, modelándolo con dos ecuaciones distintas, cada una de ellas con los parámetros más significativos en cada rango de operación. Partiendo de los parámetros individuales, se construye el modelo de asociación para ambos modos de funcionamiento, obteniendo los parámetros de la asociación para cada tramo de curva. El parámetro que nos ocupa, la R_p , está presente tanto en el modelo de comportamiento en operación inversa como directa. Dado que la mayoría de los datos de R_p individuales obtenidos en este trabajo están calculados a partir de medidas en rangos de tensiones negativas (o equivalentes a negativos al sombrear las células), se utilizará el modelo de asociación en serie de dispositivos fotovoltaicos en operación inversa. Hay que decir que la ecuación obtenida en [5] para el valor de R_p de la asociación serie partiendo de los modelos en polarización directa es la misma que para inversa, aunque las simplificaciones realizadas en el desarrollo matemático son distintas.

La ecuación general que se aplicará para la corriente de la célula en operación inversa es la ya descrita en la fórmula (2.11), mostrada también a continuación:

$$I = \frac{I_N}{1-K_e} = \frac{I_N}{1-\exp\left\{B_e\left(1-\sqrt{\frac{\Phi_T-V_b}{\Phi_T-V}}\right)\right\}} \quad , \quad (2.31)$$

donde I_N se ajusta a una parábola. B_e , es un parámetro adimensional cuasi-constante con un valor promedio de ~ 3 para células solares típicas en el rango comprendido entre 0 y el voltaje de disrupción V_b . El potencial termodinámico de la unión viene representado por Φ_T .

Al igual que para el dispositivo individual, para el cálculo de los parámetros de la asociación, se consideran aquellas zonas de la curva en que cada uno tiene mayor influencia. En las proximidades de la disrupción se obtienen los parámetros de voltaje de ruptura V_b y la pendiente de la curva, mientras que en las proximidades de cortocircuito se obtendrán los parámetros de la parte lineal del ajuste de I_N , es decir:

$$I_N \cong I_{sc} - \frac{V}{R_p} \quad , \quad (2.32)$$

Zona próxima a la disrupción

Partiendo de la ecuación (2.31) y tras realizar distintas operaciones y desarrollos en serie de Taylor, en la tesis de M.C. Alonso-García, [5] se llega a:

$$V = V_b + \frac{2(\Phi_T-V_b) \cdot I_{nb}}{B_e} \frac{1}{I} \equiv V_b + P_b \frac{1}{I} \quad , \quad (2.33)$$

donde $I_{nb} \equiv I_N(V_b)$

En una primera aproximación, V_b puede calcularse como la ordenada en el origen de la extrapolación lineal de V frente a $1/I$. Posteriormente mediante procesos de iteración se calcula I_{nb} y P_b .

Con estos valores ya obtenidos e imponiendo $B_e=3$ se recalcula V_b despejándolo de (2.34).

$$P_b = \frac{2(\Phi_T - V_b) \cdot I_{nb}}{B_e} \quad (2.34)$$

Para N células, en nuestro caso 72, el valor del voltaje de disrupción, V_b , y P_b , se obtiene como suma de los valores de los dispositivos individuales:

$$V_{b,modulo} = \sum_{i=1}^N V_{bi} \quad (2.35)$$

$$P_{b,modulo} = \sum_{i=1}^N P_{bi} \quad (2.36)$$

Zona próxima al cortocircuito

En esta aproximación (para voltajes próximos a cortocircuito), supondremos que el factor de multiplicación, $(1-K_e)$, es igual a 1, de manera que, para cada célula, la ecuación (2.31) queda:

$I_i=I_{Ni}$, donde el subíndice i indica la célula individual dentro del número total de células asociadas.

En esta región, próximos a $V=0$, se define I_N como una parábola de segundo orden, donde sus coordenadas en el origen, término de primer orden y el término de

segundo orden se definen, respectivamente, como la corriente en el origen, la inversa de la R_p y el parámetro de ajuste c :

$$I_{Ni} = I_{sci} - V_i/R_{pi} + c_i \cdot V_i^2 \quad (2.37)$$

Siendo la conductancia un parámetro aditivo para las N células en serie presentes en un módulo. Por tanto:

$$R_{p,module} = \sum_{i=1}^N R_{p,i} \quad (2.38)$$

2.4.3.2. Medida de R_p de células embebidas en los módulos

Como se ha explicado en la sección 2.3, en nuestro caso se puede saber el grupo al cual pertenecen las células dentro de cada módulo y por tanto también los promedios y desviaciones estándar de sus parámetros eléctricos. Sin embargo no es posible conocer la resistencia paralelo de cada célula dentro del módulo. Para ello se recurrirá al sombreado individual de las células del módulo.

Para este experimento, los dos módulos, MA y MB, se han medido en el simulador solar *PASAN SunSim3c* en condiciones estándar de medida (1000 W/m² y 25 °C de temperatura). Durante la obtención de la curva I-V de todo el módulo, la célula a medir, es completamente tapada (sombreada) con una máscara opaca (ver *Figura 2-22*). Dicha máscara se ha fabricado de varios materiales opacos para no permitir la entrada de luz. Su forma y área coincide con la de las células que están siendo sombreadas, de manera que no se haga sombra sobre las células contiguas. Sin embargo existen reflexiones y efectos de borde que hacen que una pequeña proporción de luz llegue a la célula medida.

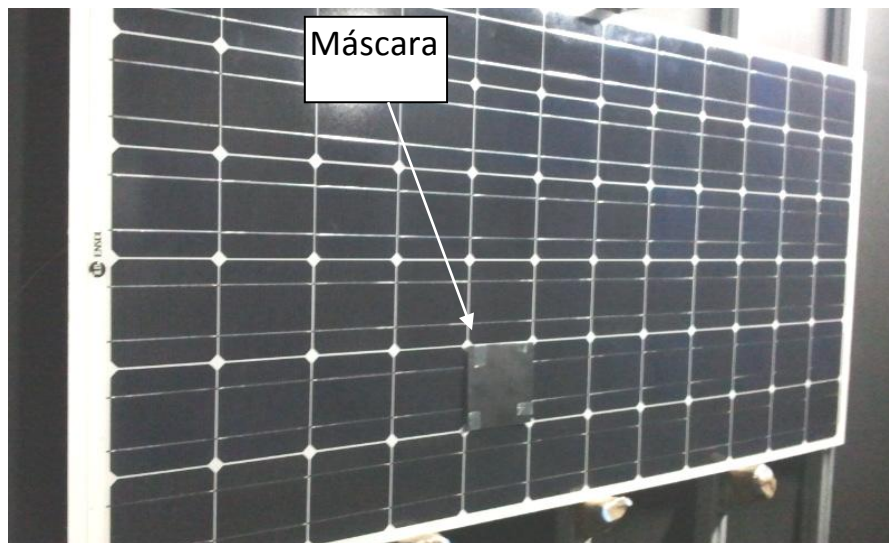


Figura 2-22. Procedimiento de medida de la R_p de las células una vez están embebidas en el módulo. Mientras se hace la curva I-V, cada célula se tapa individualmente mientras el resto del módulo es iluminado.

Según se ha descrito en la sección 2.2.1, la curva I-V obtenida refleja el comportamiento en polarización inversa de la célula tapada. De la curva I-V de la célula en cuestión, se puede extraer la R_p .

Se han obtenido un total de 144 curvas I-V (tantas como células hay en los dos módulos) por el método descrito. A modo de ejemplo, en las gráficas de la *Figura 2-23* y *Figura 2-24* se muestran las curvas de una de las células del módulo MA y MB respectivamente.

Para la protección de las células medidas, y que estas no reciban un voltaje en inversa demasiado elevado como para dañarlas, los diodos de protección fueron otra vez soldados al circuito del módulo. Como, debido al diseño del módulo, se tienen 24 células por cada diodo, se asegura que cada célula medida no recibe más de 15 V (en inversa).

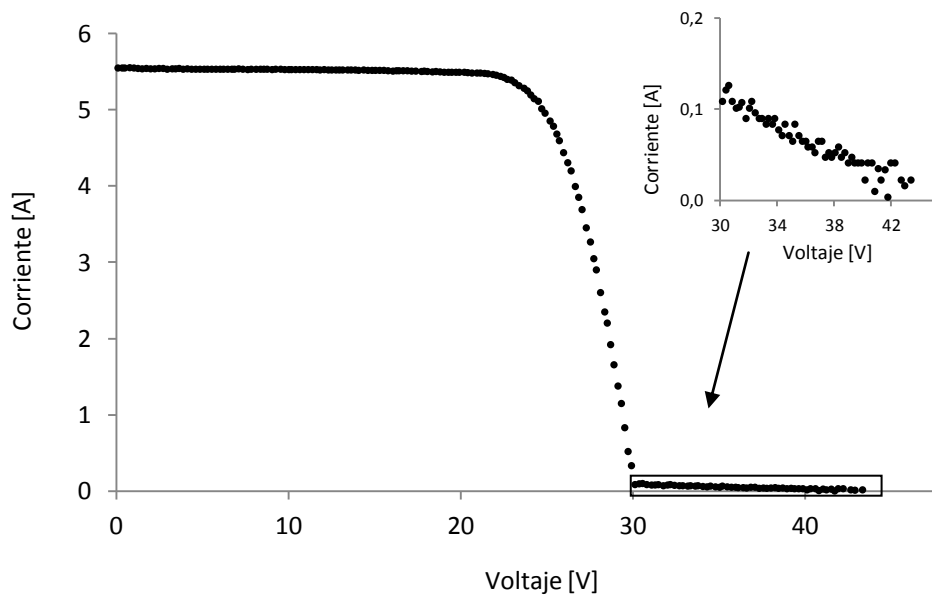


Figura 2-23. Curva I-V el módulo MA obtenida mientras una de las células estaba siendo tapada. El inserto de arriba a la derecha es una ampliación de la región cuasi-lineal (cuadro azul) que se corresponde con el comportamiento en polarización inversa de la célula completamente sombreada.

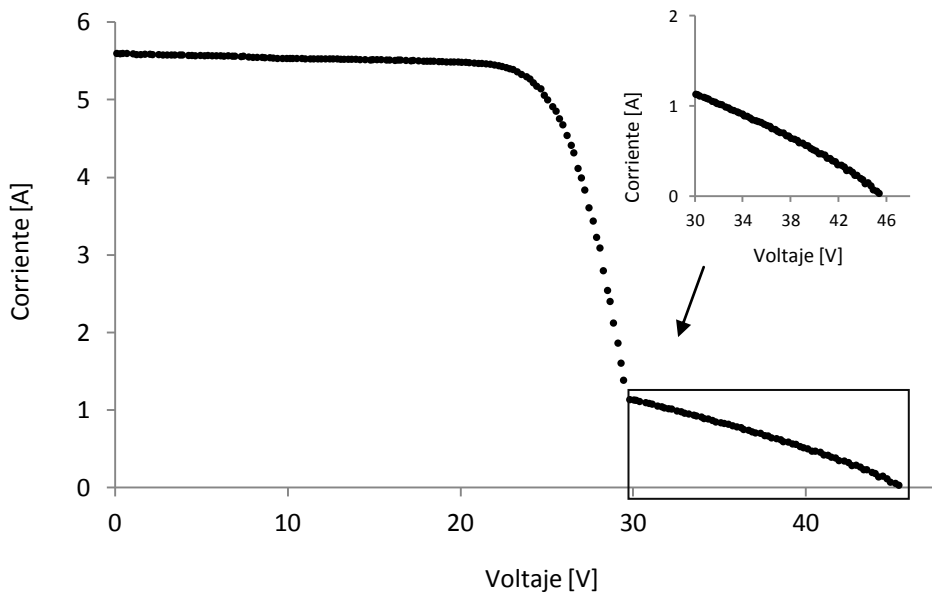


Figura 2-24. Curva I-V el módulo MB obtenida mientras una de las células estaba siendo tapada. El inserto de arriba a la derecha es una ampliación de la región cuasi-lineal (cuadro azul) que se corresponde con el comportamiento en polarización inversa de la célula completamente sombreada.

En ambas figuras se puede observar la parte de la curva I-V (incluida en el recuadro) de la gráfica que se corresponde con el comportamiento en polarización inversa de la célula completamente sombreada. La región cuasi-lineal de la curva I-V antes de la activación del diodo se corresponde con la curva I-V de la célula sombreada en condiciones de polarización inversa y oscuridad [2] [48] [64]. Después de medir todas las células de ambos módulos (MA y MB), se observó en la curvas I-V que ninguna célula presentaba disrupción, por lo que para describir la región cuasi-lineal de cada célula se ha utilizado el modelo basado en el numerador de la ecuación (2.31), I_N . Por tanto la corriente de cada célula perteneciente a los módulos en condiciones de oscuridad y polarización inversa viene descrita por (2.37) (sección 2.4.3.1, modelo de asociación)

$$I = I_{sc} - V/R_p + cV^2 \quad (2.39)$$

Como la célula sombreada completamente se encuentra, dentro del módulo, polarizada por el resto de células, la curva en inversa de dicha célula (región cuasi-lineal) está desplazada hacia valores positivos una cantidad igual a $V_{oc} - V_i$, donde V_i es el voltaje de la célula tapada, V_{oc} es el voltaje en circuito abierto del módulo en condiciones de iluminación y sin ninguna célula sombreada. V , en las ecuaciones (2.39) y (2.40), es el voltaje medido en los terminales del módulo. Por este motivo, la ecuación (2.39) debe ser corregida y desplazada hacia el origen mediante la resta de $V_{oc} - V_i$. Así se obtiene:

$$I = I_{sc} - (V - V_{oc} + V_i)/R_p + c(V - V_{oc} + V_i)^2 \quad (2.40)$$

Finalmente, la R_p de cada célula se obtiene haciendo el ajuste de la región cuasi-lineal a la ecuación (2.40) y posteriormente obteniendo su derivada para $V = V_{oc} - V_i$:

$$\left| \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_{oc}-V_i} = 1/R_p \quad (2.41)$$

La *Tabla 2-7* muestra las R_p obtenidas para cada una de las células embebidas en los dos módulos. Al final de la tabla se pueden ver los promedios y sus desviaciones estándar, así como los coeficientes de regresión del ajuste realizado en toda la región cuasi-lineal.

Los resultados obtenidos mediante la ecuación (2.41) fueron comparados con los obtenidos aplicando la ecuación de d'Alessandro [47], (ecuación (2.13)) mostrada también a continuación. La R_p calculada en la 2ª y 3ª columna han sido obtenidas teniendo en cuenta toda la región cuasi-lineal de la curva I-V de cada célula en polarización directa (ver *Figura 2-23* y *Figura 2-24*).

$$R_{p,dark} \approx R_{qlm} + \left| \frac{dV_{string}}{dI_{string}} \right|_{V_{string}=V_{oc}} - N \cdot A \cdot V_T \cdot \left(\frac{1}{I_{sc} - I^*/2} - \frac{1}{I_{sc}} \right)$$

Se puede ver que ambas ecuaciones arrojan resultados muy similares. Los números de la primera columna representan la posición de la célula dentro del módulo cuando éste es visto de frente, según la posición de medida en la que se coloca en el simulador solar (ver *Figura 2-22*), con la caja de conexiones a la izquierda. Así el primer número representa la columna (o string) y el segundo la fila, o número de célula dentro del string.

Célula	R_p MA [Ω]	R_p MB [Ω]	R_p MA D'Aless [Ω]	R_p MB D'Aless [Ω]
1,1	638,57	20,15	637,50	19,01
1,2	3028,47	18,40	3027,40	17,28
1,3	3415,18	18,30	3414,11	17,16
1,4	730,99	22,85	729,92	21,72
1,5	5407,45	21,20	5406,38	20,08
1,6	318,47	16,85	317,40	15,73
1,7	2501,31	15,47	2500,24	14,35
1,8	119,06	15,21	117,99	14,08
1,9	1595,15	14,21	1594,08	13,08
1,10	1082,26	20,32	1081,19	19,20
1,11	418,55	19,92	417,48	18,80
1,12	331,13	16,94	330,05	15,82
2,1	595,95	34,06	594,88	32,96
2,2	228,83	15,26	227,76	14,14
2,3	723,69	45,85	722,62	44,76
2,4	299,51	14,87	298,44	13,75
2,5	1401,48	48,81	1400,41	47,72
2,6	190,99	11,85	189,92	10,72
2,7	24,72	24,71	23,64	23,62
2,8	1161,31	26,02	1160,23	24,93
2,9	631,71	218,46	630,64	217,34
2,10	295,95	26,65	294,88	25,55
2,11	465,40	109,26	464,33	108,17
2,12	152,02	25,56	150,95	24,46
3,1	429,18	38,91	428,12	37,81
3,2	3359,20	19,61	3358,12	18,51
3,3	149,30	50,88	148,22	49,79
3,4	304,32	63,12	303,25	62,03
3,5	2617,80	39,75	2616,73	38,65
3,6	1519,69	23,33	1518,61	22,23
3,7	2457,24	15,44	2456,17	14,32
3,8	332,01	15,44	330,93	14,35
3,9	9551,10	30,66	9550,03	29,56
3,10	205,42	51,33	204,35	50,24
3,11	609,76	59,57	608,68	58,48
3,12	611,62	46,28	610,55	45,19
4,1	515,46	32,27	514,39	31,17
4,2	585,97	104,90	584,90	103,81
4,3	1997,80	60,23	1996,73	59,14
4,4	493,83	46,96	492,76	45,87
4,5	344,83	46,17	343,76	45,08
4,6	21231,00	31,84	15914,93	30,75
4,7	591,72	45,79	590,65	44,70
4,8	523,29	20,55	522,21	19,45
4,9	48,69	11,17	47,61	10,04
4,10	111,61	139,08	110,54	138,00
4,11	449,91	10,45	448,84	9,31
4,12	117,37	65,18	116,29	64,09
5,1	43,10	42,43	42,03	41,33
5,2	89,81	42,43	88,74	41,34

Célula	R_p MA [Ω]	R_p MB [Ω]	R_p MA D'Aless [Ω]	R_p MB D'Aless [Ω]
5,3	2195,68	24,64	2194,61	23,54
5,4	735,53	88,67	734,46	87,58
5,5	292,69	19,72	291,62	18,62
5,6	200,26	19,77	199,19	18,67
5,7	114,40	29,17	113,32	28,08
5,8	269,07	14,73	268,00	13,63
5,9	33,01	32,60	31,94	31,50
5,10	484,40	16,09	483,33	14,99
5,11	19,00	21,54	17,93	20,44
5,12	208,69	17,52	207,61	16,42
6,1	599,16	20,79	598,09	19,69
6,2	3649,64	17,74	3648,56	16,64
6,3	632,96	21,93	631,89	20,83
6,4	166,06	15,64	164,99	14,53
6,5	461,89	22,37	460,82	21,27
6,6	461,89	21,95	460,82	20,85
6,7	311,37	19,83	310,30	18,73
6,8	263,16	12,25	262,09	11,13
6,9	227,79	20,30	226,72	19,19
6,10	1136,36	16,15	1135,29	15,03
6,11	625,00	19,29	623,93	18,18
6,12	1237,81	17,51	1236,74	16,40
Media	1241	35	1240	34
Desv. estándar	2796	32	2795	28
Promedio de coeficiente de regresión R^2	0,92	0,99	0,92	0,99

Tabla 2-7. Valores de R_p obtenidos mediante el método de sombreado individual de cada célula dentro del módulo. Se compara en esta tabla la R_p obtenido por ajuste lineal directo (columnas 2ª y 3ª) o utilizando la ecuación de d'Alessandro (2.13), (columnas 4ª y 5ª).

Como se puede ver en la Tabla 2-7, existe una gran dispersión de la R_p , en la que la desviación estándar es incluso mayor que el promedio. Esto es algo frecuente en células, en las que la resistencia paralelo es, con diferencia, el parámetro eléctrico que presenta mayor dispersión.

Los resultados de R_p de las células dentro de cada módulo (Tabla 2-7) serán utilizados, en la siguiente sección, para comparar la R_p de módulo obtenidas por las diferentes técnicas utilizadas.

2.4.3.3. Comparación entre los valores de R_p obtenidos en la célula y el módulo

Con los valores de R_p resultantes del método de sombreado y que figuran en la *Tabla 2-7* para ambos módulos, MA y MB, se puede aplicar el modelo de asociación de células en serie (2.38) y sumar las R_p obtenidas:

$$R_{p_{MA}} = \sum_{i=1}^{72} R_{p_i} = 89375 \Omega \quad (2.42)$$

$$R_{p_{MB}} = \sum_{i=1}^{72} R_{p_i} = 2485 \Omega \quad (2.43)$$

Si comparamos estos resultados con los que se obtendrían de multiplicar la R_p promedio dada por el *cell tester* (*Tabla 2-2*), por 72 células que tiene el módulo, se obtiene:

$$R_p \text{ módulo MA} = 211 * 72 = 15192 \Omega \quad (2.44)$$

$$R_p \text{ módulo MB} = 37 * 72 = 2664 \Omega \quad (2.45)$$

La tabla *Tabla 2-8* resume todos los resultados obtenidos, estando remarcados en **negrita** los mencionados en esta sección.

Modulo	R_p de módulo medida por Pasan	R_p de módulo medida por Berger	Promedio de R_p de célula medida por cell tester*72	Ajuste polinomial	Ajuste lineal	Método de resistencia externa	Suma de R_p de célula dentro de módulo
MA, R_p [Ω]	834	887	15192	83373	83764	83778	89375
MB, R_p [Ω]	349	470	2664	1726	1933	2236	2485

*Tabla 2-8. Tabla resumen que recoge los resultados de R_p obtenidos por distintas técnicas. En **negrita** se resaltan las comparaciones mencionadas en esta sección.*

Para el caso del módulo MA, el valor de resistencia paralelo ($R_p=15192 \Omega$) resultante de multiplicar el valor promedio de R_p de célula dado por el *cell tester* por el número de células en serie (según (2.44)), es muy inferior al resultante de sumar las R_p individuales medidas sombreando cada célula (según (2.42)), ($R_p = 89375 \Omega$). Esto nos indica que, al igual que ocurre con la medida de la R_p de módulos obtenida a partir de curvas I-V en iluminación con simulador solar, los medidores de células o “*cell tester*”, dan valores de R_p apreciablemente inferiores a los obtenidos por otras técnicas.

Sin embargo, los resultados obtenidos mediante el método de suma de las R_p calculadas al sombrear cada célula (según (2.42) y (2.43)), están mucho más próximos (con una diferencia menor al 6% y al 10% para MA y MB respectivamente) a los obtenidos por el método de resistencia externa que los dados por sistemas comerciales. Esa diferencia (6% y 10%), es atribuible al error experimental inherente a la medida de las células dentro del módulo (baja resolución en corriente y voltaje de los equipos comerciales utilizados, error en la determinación de V_{oc} en la curva I-V de cada célula, cierta cantidad de luz que pasa por el borde de la máscara, errores en el ajuste de la curva en la región cuasi-lineal, etc.)

2.4.4. MEDIDA DE LOS MÓDULOS A DISTINTAS IRRADIANCIAS

Una vez obtenida la resistencia paralelo de los módulos, el siguiente paso es relacionar la eficiencia del módulo a distintas irradiancias con la resistencia paralelo. En la presente sección y en la siguiente se persiguen tres objetivos:

- Verificar una posible dependencia de R_p con la irradiancia (sección 2.4.4).
- Evaluar el impacto de la resistencia paralelo en la eficiencia del módulo a distintas irradiancias (sección 2.4.4).

- Evaluar el impacto de la resistencia paralelo en la producción anual de un sistema fotovoltaico ubicado en dos localizaciones diferentes (sección 2.4.5).

Ambos módulos, MA y MB, fueron medidos en el simulador solar (o *Flash Tester*) *Pasan SunSim3c* a distintas irradiancias para relacionar la eficiencia a bajas irradiancias con la resistencia paralelo del módulo. Las gráficas de la *Figura 2-25* muestran las curvas I-V de cada módulo medidas a distintas irradiancias, desde 78 W/m^2 hasta 1100 W/m^2 . Se ha medido la curva I-V también para voltajes negativos relativamente pequeños (hasta -2 V). Para evitar cualquier influencia de la temperatura, todas las medidas fueron realizadas a una temperatura de 25°C .

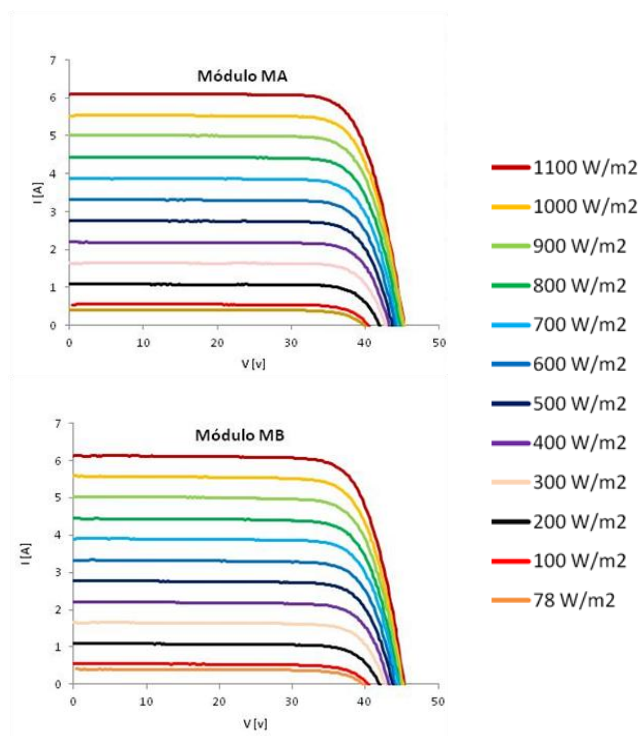


Figura 2-25. Curvas I-V de los módulos MA y MB medidas con el simulador Pasan y tomadas a distintas irradiancias

La resistencia paralelo promedio dada por el Pasan, para el módulo MA, ha sido de $3256\ \Omega$, con una desviación estándar de $2186\ \Omega$. Para el módulo MB el promedio de R_p ha sido $1117\ \Omega$ con una desviación estándar de $310\ \Omega$. No se encontró ninguna

tendencia de R_p con la irradiancia en el conjunto de medidas realizadas a ambos módulos, y sí valores muy dispersos, especialmente para el módulo MA, inherentes al cálculo de la pendiente en una zona de la curva con muy poca variabilidad en los valores de corriente. Se requeriría una mayor resolución para detectar estas pequeñas variaciones y poder calcular la R_p , por este método, de un modo más fiable.

Posteriormente, la eficiencia de cada módulo fue calculada dividiendo su potencia entre el área del módulo (ambos módulos presentan la misma área). La *Figura 2-26* muestra la eficiencia del módulo frente a la irradiancia. Aunque a niveles altos de irradiancia (1000 and 1100 W/m²) la eficiencia de ambos módulos es la misma, en condiciones de baja irradiancia (por debajo de 600 W/m²), la eficiencia del módulo MB disminuye, con respecto a la del módulo MA, hasta un 6,7%, lo cual puede tener un gran efecto en la energía anual producida por un sistema fotovoltaico compuesto por estos módulos. Esto se verá en más detalle en la sección 2.4.5.

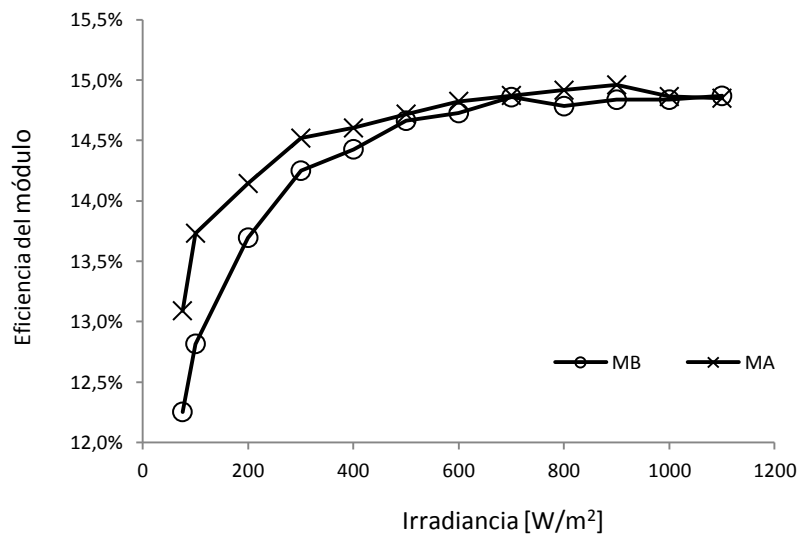


Figura 2-26. Representación de la eficiencia de área activa de cada módulo en función de la irradiancia. Ambos módulos presentan la misma eficiencia para altas irradiancias, mientras que la disminución de la eficiencia para el módulo MB es más pronunciada a eficiencias bajas.

2.4.5. PREDICCIÓN DE ENERGÍA ANUAL PRODUCIDA CON DOS TIPOS DE MÓDULOS

En esta sección se hace una simulación detallada de la energía anual generada por una instalación compuesta por módulos MA en comparación con una instalación idéntica compuesta por módulos MB. Con ello se pretende conocer la influencia de la R_p en la merma de producción de energía del módulo MB frente al módulo MA. La simulación se ha completado haciendo las dos suposiciones de R_p :

- a) R_p constante con la irradiancia y de valor el obtenido por el método de resistencia externa y,
- b) R_p variable con dependencia exponencial según es determinada por Mermoud [52] de acuerdo con la ecuación (2.46)

$$R_p = R_p(G_{ref}) + (R_p(0) - R_p(G_{ref})) \cdot \exp\left(-R_p^{Exp} \cdot \frac{G}{G_{ref}}\right) \quad (2.46)$$

donde G_{ref} es la irradiancia de referencia, $R_p(0)$ es la resistencia paralelo obtenida en oscuridad, $R_p(G_{ref})$ es la resistencia paralelo obtenida a la irradiancia de referencia (en nuestro caso a 1000 W/m^2) y R_p^{Exp} es un factor empírico de parametrización cuyo valor de 5,5 (obtenido en el mismo estudio [52]), ofrece una buena aproximación para la mayoría de módulos.

Para hacer la simulación se ha empleado el programa de simulación de sistemas fotovoltaicos PVSyst [57], usado para predecir la producción de energía de las instalaciones fotovoltaicas. Para hacer la simulación de la influencia de la R_p del módulo en la producción anual de energía, se introdujeron en el programa dos instalaciones de muestra, una compuesta por módulos MA y otra por módulos MB.

Además, se hizo la comparación en dos localizaciones distintas, Glasgow y Hamburgo, elegidas por estar situadas en una latitud relativamente alta y por tanto, con irradiaciones bajas en las que la R_p tiene más influencia.

Cada instalación consta de 100 kW de potencia pico instalada con módulos orientados al sur y con 30 grados de inclinación cenital (inclinación óptima para las dos localizaciones).

Como se ha comentado en la sección anterior (2.4.4), no se ha encontrado ninguna relación entre la irradiancia y la R_p . Sin embargo en las simulaciones realizadas, se ha tenido en cuenta también el caso en el que esa relación fuera real y que por tanto es la causante de la diferencia entre la R_p obtenida en oscuridad (por el método de resistencia externa o por el método estándar en oscuridad y voltaje negativo) y la R_p obtenida en iluminación (dada por Pasan). Así, se simularan además módulos con la R_p con dependencia exponencial (según la ecuación (2.46)) y módulos con una R_p constante. De esta manera se estima también el error que se puede cometer al introducir un supuesto (R_p no dependiente de la irradiancia y con valor dado por el método de resistencia externa) u otro (R_p dependiente de la irradiancia).

Para el caso de la R_p exponencial, supondremos que:

$R_p(0)$ = dato de R_p obtenido por el método de resistencia externa

$R_p(G_{ref}) = R_p(1000 \text{ W/m}^2)$ = dato de R_p dado por el Pasan a 1000 W/m^2

$R_p^{Exp} = 5,5$ valor obtenido empíricamente por Mermoud.

Si representamos la resistencia paralelo de la ecuación (2.46), que a partir de ahora denominaremos (R_{pE}), con los datos especificados anteriormente se obtiene la gráfica de la *Figura 2-27*:

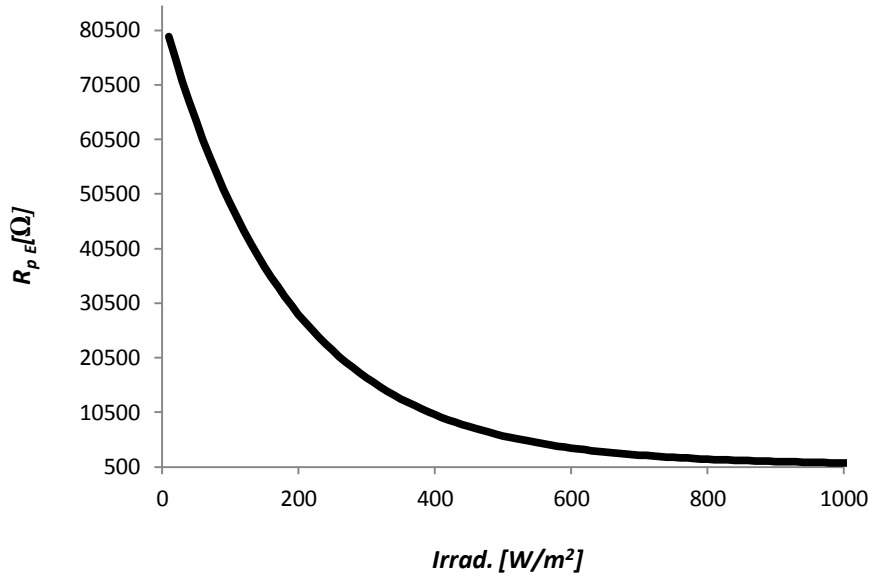


Figura 2-27. Dependencia de la R_p con la irradiancia según la ecuación de Mermoud e introduciendo los valores experimentales para el módulo MA: $R_p(0) = 83778 \Omega$, $R_p(G_{ref}) = 834 \Omega$.

Por tanto, sobre cada instalación se han realizado cuatro simulaciones distintas, que son:

- 1) Instalación compuesta por módulos MA con R_p constante y determinada según el método de resistencia externa (Abreviado como MA, $R_{p\ ct}$)
- 2) Instalación compuesta por módulos MB con R_p constante y determinada según el método de resistencia externa (Abreviado como MB, $R_{p\ ct}$)
- 3) Instalación compuesta por módulos MA con R_p variable y comportamiento exponencial. (Abreviado como MA, $R_{p\ \epsilon}$)
- 4) Instalación compuesta por módulos MB con R_p variable y comportamiento exponencial. (Abreviado como MB, $R_{p\ \epsilon}$)

Para los casos de dependencia exponencial de la R_p con la irradiancia (casos 3 y 4), se ha utilizado la ecuación propuesta por Mermoud, imponiendo que la R_p a irradiancia cero sea la obtenida por el método de resistencia externa, mientras que a irradiancia $1000 W/m^2$, la R_p del módulo es aquella dada por el sistema Pasan. De esta manera,

estamos suponiendo que, de ser cierta la aproximación exponencial de Mermoud (2010) (ecuación (2.46)), la diferencia entre los resultados obtenidos por el método de resistencia variable (realizado en oscuridad) y los obtenidos midiendo con el sistema Pasan, se debe exclusivamente a que en el primer caso se mide en oscuridad y en el segundo caso se mide a 1000 W/m^2 .

Por otro lado, se puede ver en la *Tabla 2-9*, que utilizando la resistencia paralelo con dependencia exponencial (R_{pE}), la simulación del PVsyst da desde un 0,6% hasta un 1,13% más de Energía Anual Acumulada (EAA) para una misma instalación suponiendo la R_p constante (R_{pct})

Estos resultados también revelan el aumento de la energía anual producida causado por una resistencia paralelo mayor. Es decir, qué porcentaje produce de más una instalación compuesta por módulos MA en comparación con módulos MB (columna 4 de la *Tabla 2-9*).

Bajo la simulación hecha en el PVsyst se han llegado a aumentos de energía anual producida de hasta un 2,2 % mayor para el módulo MA que para el módulo MB.

	Caso	EAA [kWh/año]	Diferencia (A-B)/B [%]
Hamburgo	1) MA, R_{pct}	87504	1,50%
	2) MB, R_{pct}	86211	
	3) MA, R_{pE}	88425	1,94%
	4) MB, R_{pE}	86741	
Glasgow	1) MA, R_{pct}	77384	1,69%
	2) MB, R_{pct}	76099	
	3) MA, R_{pE}	78258	2,19%
	4) MB, R_{pE}	76584	

Tabla 2-9. Valores de Energía Anual Acumulada por dos instalaciones modelo de 100 KW cada una. Las simulaciones se han hecho con módulos MA y MB, así como para dos localizaciones distintas, Hamburgo y Glasgow. Se ha tenido en cuenta tanto la dependencia de la R_p con la irradiancia (R_{pexp}) como una R_p independiente de la irradiancia (R_{pct}).

En la *Figura 2-28* se muestra, a modo de ejemplo, uno de los informes generado para calcular la Energía Anual Acumulada por una de las instalaciones propuestas.

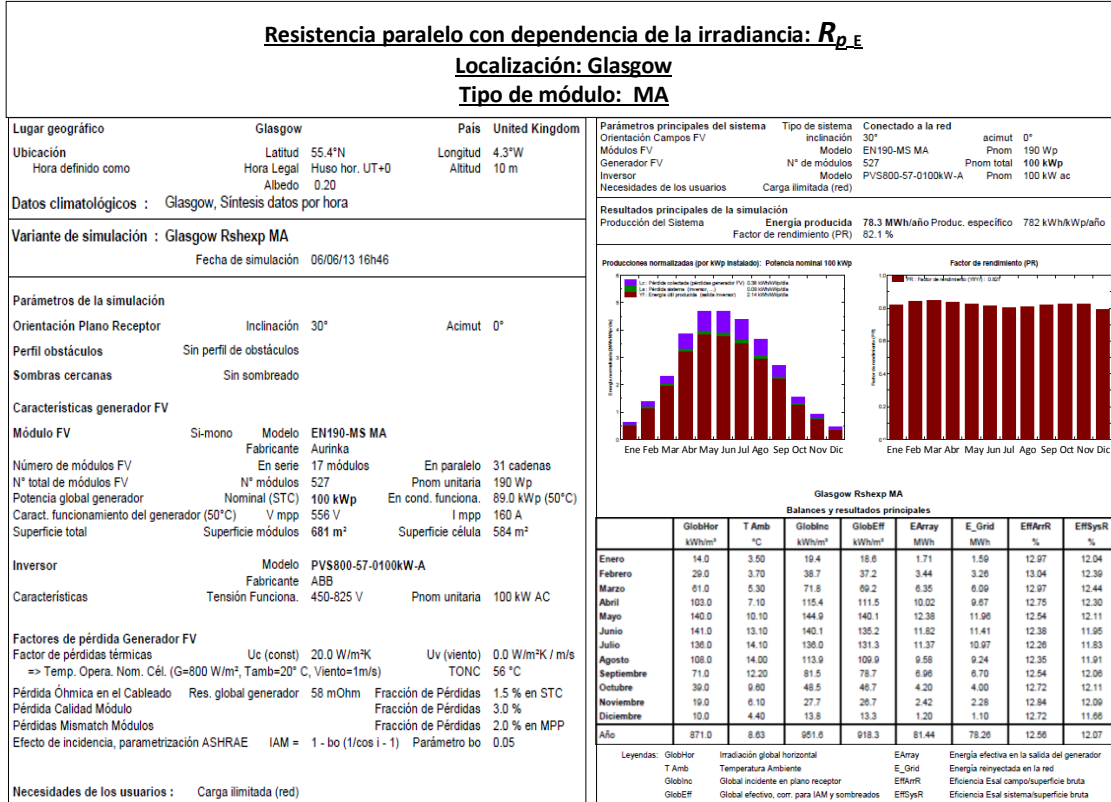


Figura 2-28. Informe generado por el PVsyst para una de las instalaciones propuestas (Glasgow, con módulo MA y resistencia paralelo dependiente de la irradiancia)

2.5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Mediante la utilización de células comerciales reales y módulos estándar fabricados con ellas, se ha realizado la medida de la resistencia paralelo con diversos métodos. Los métodos utilizados han sido tanto comerciales; con simuladores solares Pasan y Berger, como de laboratorio; medida de la característica I-V en polarización inversa y en oscuridad y ajuste de la misma. Los dos métodos anteriormente mencionados dan valores muy distintos de R_p de módulo.

Por otro lado se ha propuesto un método novedoso para medir la R_p de los módulos. Este método ha sido denominado método de la resistencia externa, y da resultados muy parecidos a los obtenidos al medir los módulos en polarización inversa y oscuridad y aplicando un ajuste (lineal o polinomial) de la curva obtenida. El método de la resistencia externa ha demostrado dar unos resultados menos dispersos, resultando, por tanto, ser un método más consistente para la determinación de la resistencia paralelo. Hay que distinguir, sin embargo, entre los resultados obtenidos para el módulo con R_p baja (MB) y el de R_p alta (MA). Para el caso del módulo con R_p baja, los dos métodos propuestos han dado valores de R_p mayores (entre 4 y 6 veces mayores) que los obtenidos por los sistemas comerciales. Sin embargo, para el módulo con R_p muy elevada (como el MA), los métodos que operan en oscuridad y en polarización inversa, dan valores de R_p mucho más grandes (aproximadamente 100 veces mayores) que los obtenidos en iluminación a partir de las curvas I-V convencionales.

Para corroborar la verosimilitud de los dos últimos métodos comparados con los métodos comerciales, se ha medido la resistencia paralelo de las células dentro de cada módulo mediante el método de sombreado completo de las células. Aplicando la teoría de asociación de los dispositivos en serie, se llega a una R_p de módulo muy similar a la obtenida por los dos últimos métodos. Por otro lado, la R_p de las células individuales antes de ser procesadas para fabricar módulos, fue medida en un *cell tester* comercial. En ese caso, la R_p de las células es también medida en polarización inversa y en oscuridad. Si comparamos los resultados obtenidos con el *cell tester* con

los obtenidos mediante el sombreado de células en módulos, se puede ver que el *cell tester*, al igual que los simuladores solares destinados a medir módulos, también infravalora la R_p (en este caso de célula) cuando esta es elevada. Esta diferencia puede ser relacionada, principalmente, con la baja resolución en corriente de los equipos comerciales, así como un ajuste deficiente debido a la escasez de puntos obtenidos.

Por último, los dos módulos fabricados para este trabajo, se han medido a distintas irradiancias, quedando evidente la caída de eficiencia del módulo con menor R_p (MB) con respecto al de mayor R_p (MA) a bajas irradiancias. En estas medidas no se ha detectado ninguna dependencia de la R_p con la irradiancia, no obstante, en la simulación de plantas FV realizada, se tuvo también en cuenta la dependencia propuesta por Mermoud [52]. Los resultados obtenidos en las simulaciones muestran que la energía anual acumulada, en una planta construida con módulos MA, es hasta un 2,2 % mayor que la construida con módulos MB. Aunque se trata de una simulación, los datos han sido tomados de módulos reales, fabricados con células reales y presentes en el mercado, con lo que esta, es una situación que puede darse en un caso real. De ahí la importancia de una correcta caracterización de la R_p del módulo.

Capítulo 3

3. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA DISPERSIÓN EN PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE CÉLULAS SOLARES SOBRE LA PÉRDIDA RELATIVA DE POTENCIA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

3.1. INTRODUCCION Y ESTADO DEL ARTE

Una de las mayores fuentes de problemas en la fabricación de módulos y por consiguiente en su rendimiento en plantas fotovoltaicas es la agrupación de células con parámetros eléctricos muy diferentes.

Son diversos los estudios realizados acerca de la dispersión en parámetros eléctricos de módulos y su influencia en la pérdida de potencia cuando los módulos son conectados en serie o en paralelo. Esa diferencia o dispersión en los parámetros eléctricos de dispositivos fotovoltaicos que son conectados entre sí se conoce también como *mismatch*. Así, se define en esos estudios, el término *Relative Power Loss* (RPL) o *Mismatch Loss* (MML), como la diferencia de potencia entre la asociación de dispositivos (ya sea en serie o en paralelo o la combinación de ambos) y la suma de las potencias individuales de cada uno de los dispositivos por separado. Esa diferencia puede ser relativa a un valor nominal de potencia o a la suma de las potencias individuales.

Muchos de estos estudios abordan el tema desde el punto de vista analítico, desarrollando programas capaces de simular el comportamiento de la asociación de módulos en distintas configuraciones [65] [66] [67] [68] [69] [70]. Por otro lado, otros autores se aproximaron al problema desde un punto de vista experimental [71] [72] [73], lo que supone un gran coste en recursos humanos y de tiempo, añadido a la dificultad de realizar medidas en condiciones estándar en el exterior, así como la aparición de efectos angulares debidos a la incidencia no perpendicular de los rayos del Sol. Debido a esto, suele ocurrir que el número de muestras estudiadas es escaso. Otro de los problemas de los estudios de *mismatch* en asociaciones de módulos es la dificultad de aislar los parámetros a estudiar de otros efectos que pueden influir en la medida, como es la presencia de diodos de puenteo o *bypass*, degradaciones no homogéneas de células y/o soldaduras, influencia de la irradiancia y la temperatura, etc, [68].

Sin embargo, son pocos los estudios experimentales realizados sobre la asociación de células [74] [75] [76] [77] [78] [79]. Estos reflejan estimaciones teóricas y existen pocas evidencias experimentales de los resultados obtenidos. Así, Kaushica *et al*, llegaron a una RPL de hasta el 12% atribuyendo la causa del *mismatch* al envejecimiento de ciertas células con respecto a otras dentro del mismo módulo.

Con el objeto de clarificar más la influencia de la dispersión de diversos parámetros eléctricos en el RPL, este estudio se centra en la asociación en serie de células para formar módulos. Con esto se pretende evitar la influencia de agentes externos, como ocurriría con la asociación en serie de módulos, (las cuales forzosamente deben ser medidas en el exterior), además de poder dimensionar experimentos más abordables, al ser más sencilla y barata la manipulación de células en comparación con la de módulos.

Una de las principales dificultades reside en cuantificar la pérdida relativa de potencia (RPL) en relación a la dispersión de los parámetros elegidos. Dependiendo de cuál sea la dispersión de esos parámetros eléctricos, se originan diferentes problemas en los módulos.

Un ejemplo de parámetro de célula que puede tener una alta dispersión entre las células que forman un módulo, es la corriente de cortocircuito, I_{sc} . Es frecuente que una célula (o varias) conectada en serie con otro conjunto de células conformando un módulo, posea una I_{sc} menor que la corriente de trabajo a la que están operando el resto de células. Esto puede ocurrir por diversos factores, como la inclusión en el módulo de una célula con parámetros eléctricos muy inferiores al resto de células, o por rotura de la misma, o por sombras y manchas en el módulo [80]. En este caso la célula o células afectadas, empezarán a trabajar en polaridad inversa, lo que quiere decir que el exceso de corriente pasará por su resistencia en paralelo, R_p , produciendo un consumo de potencia y por tanto una célula caliente. En el caso de que la resistencia en paralelo esté homogéneamente distribuida por la superficie de la célula en cuestión, ésta se calentará homogéneamente, trabajando a mayor temperatura que el resto de las células del módulo. Dependiendo de multitud de agentes como irradiancia, forma del módulo, temperatura exterior, R_p , etc, ese exceso de temperatura puede variar entre 2°C y 50°C aproximadamente. En el caso de que la R_p esté localizada, nos encontramos con un punto caliente [1], lo que puede, en el caso de que el diodo de protección no se active (ver sección 2.1), elevar localmente la temperatura de la célula a más de 150°C. La activación del diodo, depende, no sólo de R_p , sino también del número de células que dicho diodo puentea [5] [49] [81] [82]. Otra forma de minimizar la pérdida de potencia es mediante la combinación de asociaciones en serie y paralelo [83]. Por todo lo mencionado anteriormente, se ha realizado el estudio de la dispersión de I_{sc} y su relación en el RPL.

En el caso de una baja dispersión de los parámetros eléctricos de los dispositivos fotovoltaicos (tanto células como módulos) asociados en serie, la corriente en el punto de máxima potencia, I_{mp} , toma un valor más relevante. Si se asocian en serie células de distintas I_{mp} , la potencia final del módulo será menor que la suma de las potencias individuales de las células, es decir $RPL > 0$. Se ha demostrado que esta dependerá de la magnitud de la desviación estándar de la I_{mp} [75]. Este es, por tanto, otro de los parámetros estudiados en este trabajo.

3.2. OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO.

En el presente capítulo se estudian las pérdidas relativas de potencia (RPL) debido al “mismatch”, es decir, a la dispersión de los parámetros eléctricos de las células cuando estas se asocian en serie para fabricar módulos. Para ello se han utilizado más de 10000 células solares comerciales, tanto monocristalinas como multicristalinas. Las células utilizadas fueron medidas y clasificadas de acuerdo a su potencia máxima (P_m), corriente en cortocircuito (I_{sc}) y corriente en el punto de máxima potencia (I_{mp}). Posteriormente, se han utilizado dichas células para la fabricación y caracterización eléctrica de módulos fotovoltaicos.

A lo largo de este capítulo se propondrá una nueva ecuación para el cálculo del RPL cuando se pasa de célula a módulo (ecuación (3.5)), basada en los parámetros habitualmente disponibles para un fabricante de módulos. La ecuación propuesta se validará de manera teórica mediante su comparación con la fórmula propuesta por Bucciarelli en el año 1979 [75] y Kaushika en el año 2007 [76], cuyos estudios teóricos del RPL son dos de los más profundos y exhaustivos.

Finalmente, la ecuación propuesta se aplicará a los resultados experimentales obtenidos, permitiendo establecer una relación empírica entre la desviación estándar de los parámetros eléctricos de célula y el RPL final obtenido sobre el módulo. Un esquema del procedimiento seguido en este capítulo se presenta en la *Figura 3-1*.

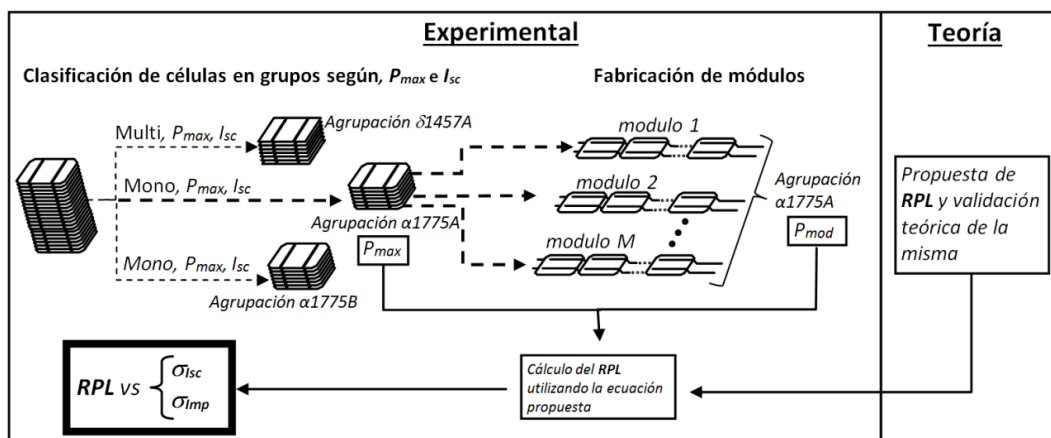


Figura 3-1. Esquema del procedimiento experimental y teórico llevado a cabo en este estudio. Las diferentes clasificaciones dan lugar a unos conjuntos de células, denominadas agrupaciones, con los que se fabricarán los módulos.

Bucciarelli llegó a una expresión que relaciona el RPL con el número de células en serie (L), la varianza de la variable estudiada (σ^2) y el parámetro de característica de célula (C) partiendo de una ecuación que describe el comportamiento de una célula en las proximidades del punto de máxima potencia:

$$\frac{I}{\overline{I_{mp}}} = \alpha - \beta e^{C\left(\frac{V}{\overline{V_{mp}}}\right)} \quad (3.1)$$

Donde $\overline{I_{mp}}$ y $\overline{V_{mp}}$ son los valores promedios de la corriente en corto circuito y el voltaje en circuito abierto respectivamente y α y β son coeficientes de ajuste de la curva.

Para el caso en el que la variación del I_{mp} suponga un pequeño porcentaje con respecto a su promedio¹, Bucciarelli llega a la siguiente expresión:

$$RPL = \frac{C+2}{2} \sigma_{\mu}^2 \left(1 - \frac{1}{L}\right) \quad (3.2)$$

Donde:

σ_{μ}^2 : es la varianza de I_{mp} dividida por su promedio, $\overline{I_{mp}}$, $\sigma_{\mu}^2 = \left(\frac{\sigma}{\overline{I_{mp}}}\right)^2$

C : es el parámetro de calidad de la célula

L : número de células en serie

¹ Aunque Bucciarelli en su trabajo no especifica la magnitud de la condición "pequeño porcentaje", cabe comentar que en nuestro caso la DER varía desde 0,3% hasta 3%, dependiendo de la agrupación considerada.

Como se verá más adelante, en nuestro estudio nos encontramos en el caso en el que las variaciones de corriente en el punto de máxima potencia, I_{mp} , son relativamente pequeñas con respecto a su promedio, por lo que puede utilizarse la ecuación (3.2).

Kaushika *et al*, utilizaron esa misma expresión en su trabajo [76], en el que compararon la ecuación (3.1) con el modelo de 1 diodo:

$$I = I_L - I_s \left\{ e^{\left[\frac{q(V+IR_s)}{AKT} \right]} - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3.3)$$

donde I_L es la corriente fotogenerada, I_s es la corriente de saturación del diodo, A es el factor de idealidad del diodo, K la constante de Boltzman, q la carga del electrón, R_s la resistencia serie, T es la temperatura de operación de la célula y R_p la resistencia paralelo. Así, llegaron a la siguiente expresión:

$$C = \frac{q \overline{V_{mp}}}{AKT} \quad (3.4)$$

Como se verá más adelante, el parámetro C está relacionado con el *Fill Factor*, FF , o más exactamente con la curvatura de la gráfica I-V en las proximidades del punto de máxima potencia [76].

En la ecuación (3.4), $\overline{V_{mp}}$ es el promedio del voltaje en el punto de máxima potencia. Los parámetros eléctricos más importantes y que definen el comportamiento eléctrico de la célula son: I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} , V_{mp} , R_s , R_p , AKT/q . Los valores de P_m y FF pueden ser expresados en función de los anteriores.

Este trabajo se centra en la asociación en serie de células para la fabricación de módulos, de esta manera, parámetros como el voltaje en el punto de máxima potencia, V_{mp} , y el voltaje de circuito abierto, V_{oc} , no tendrán influencia, ya que sus propiedades en la asociación en serie son aditivas y no limitantes. Además, en el proceso de fabricación de los módulos de muestra, la asociación en serie se realizó

siempre con los mismos materiales (cinta de interconexión, células del mismo tipo, etc) con lo que se minimiza la variación de la R_s . Por último, todos los módulos son medidos a la misma temperatura (25 ± 1) °C y a la misma irradiancia (1000 ± 20) W/m², de esta manera se minimiza la influencia de la temperatura y de la resistencia paralelo, R_p . El objetivo principal es cuantificar el RPL en la asociación en serie de células, en función de la dispersión en potencia máxima, P_m , corriente en cortocircuito, I_{sc} , y corriente en el punto de máxima potencia, I_{mp} , de dichas células. Se considera que, en la asociación en serie, son los parámetros más importantes y existen referencias de otros autores sobre su estudio [65] [72] [75].

Debido a la magnitud del experimento y al número de muestras utilizadas, este estudio abordará el problema desde el punto de vista estadístico. Para ello se utiliza una población de células que serán medidas y clasificadas según sus parámetros eléctricos. Cada clasificación de células, en adelante agrupación, será utilizada para fabricar módulos que posteriormente serán medidos. Se compara, de esta manera, la potencia promedio de los módulos obtenidos con la potencia promedio de cada una de las agrupaciones de células utilizadas para fabricarlos, obteniendo así el RPL (*Relative Power Loss*) propuesto en este estudio. Este RPL será definido más adelante en la sección 3.3.2. El tiempo transcurrido entre mediciones de células y de módulos es siempre inferior a dos días. Por otro lado, tanto la células como los módulos no son expuestos a la luz, de esta manera se minimiza el riesgo de que las medidas se vean alteradas por degradaciones diferentes en células.

Posteriormente se representará el RPL en función de la desviación estándar de cada uno de los parámetros eléctricos de célula, con el fin de obtener una relación cuantitativa entre la dispersión de un parámetro característico de la célula (se tomará la desviación estándar como parámetro representativo de la dispersión de una determinada variable) y el *mismatch* provocado por su asociación en serie. Por último, en el apartado 3.4, los resultados experimentales de RPL serán comparados con los que se obtendrían teóricamente utilizando las ecuaciones (3.2) (Bucciarelli) y (3.4) (Kaushika).

Otro de los objetivos es calcular el RPL de muestras provenientes de un suministrador comercial, con las clasificaciones y tolerancias estándares utilizadas en la industria. Así se determinará si, dentro de una misma clasificación, es rentable reclasificar las células o si por el contrario la dispersión con la que le llegan al fabricante de módulos es suficientemente baja como para no ser necesaria una segunda clasificación.

Las células utilizadas para el experimento son células comerciales monocristalinas y multicristalinas que se han clasificado en grupos según la dispersión (desviación estándar) en el parámetro considerado (I_{mp} o I_{sc}). Se han estudiado distintos rangos de dispersión, empezando por las dispersiones ofrecidas por las clasificaciones estándar de distintos suministradores de células y llegando a dispersiones mayores conseguidas mediante la mezcla provocada de distintas clasificaciones.

Una de las dificultades del estudio es aislar el efecto que tiene la dispersión de parámetros eléctricos sobre el RPL, de otras influencias denominadas Perdidas Por Encapsulado (PPE), es decir, la pérdida de potencia que provocan factores como la absorción en el EVA, el vidrio, la conexión de células en serie (con el consiguiente aumento de R_s), etc. Para conseguir esto, todos los módulos han sido fabricados con los mismos materiales, los mismos diseños y los mismos parámetros de proceso. Así, se relacionan cambios en la desviación estándar del parámetro considerado entre distintas agrupaciones con cambios en el RPL: $\Delta\sigma \leftrightarrow \Delta RPL$. Como los demás factores son constantes, dentro de un mismo subgrupo (consistente en células del mismo tipo y clasificación en potencia), se puede atribuir el cambio en el RPL al cambio en σ (ver *Figura 3-1*).

3.3. PREPARACION DE LAS MUESTRAS, MEDICION Y ANALISIS DE RESULTADOS

3.3.1. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS.

Para el estudio de la dispersión de la corriente en el punto de máxima potencia, I_{mp} , y la corriente de cortocircuito, I_{sc} , se han tomado dos tipos de células distintas: **monocristalinas** convencionales de 125x125 mm y **multicristalinas** convencionales de 125x125 mm. El motivo de esta selección es el de contar con grupos de células con distinta dispersión de sus parámetros eléctricos.

En el caso de las células **monocristalinas**, lo importante es la realización del experimento contando con unas dispersiones que atienden a una clasificación estándar de mercado. De esta manera, además de hacer el estudio de RPL en función de la dispersión, también se comprueba la validez de dicha clasificación. La eficiencia de célula elegida para realizar el experimento fue 17,75%.

En el caso de las células **multicristalinas**, se pudo contar con una población de células con una dispersión en parámetros eléctricos mucho mayor, con lo que cobra más importancia el extender el estudio a un rango de dispersiones mayor. Este grupo de células fue mezclado en origen, dando lugar a un grupo mezcla de varias eficiencias.

Ambos grupos de células han sido clasificados en potencia y posteriormente en I_{sc} o I_{mp} , según el caso. En el caso del grupo de células monocristalinas se ha utilizado la clasificación en potencia suministrada por el fabricante, mientras que en las multicristalinas, debido a su gran dispersión inicial de parámetros eléctricos, se ha utilizado una clasificación en potencia de acuerdo a los criterios especificados en el

esquema de la *Figura 3-2*. A la última clasificación utilizada para la fabricación de módulos se le ha denominado agrupación.

A la agrupación de células a estudiar se le etiqueta con una letra griega (α , β , δ), dependiendo del grupo de células del que procede. A continuación se escribe su eficiencia en enteros ($\alpha 1775$), y por último se escribe la letra que designa la agrupación (A, B, C, X) que se corresponde con una clasificación en I_{sc} o I_{mp} , en función del grupo del que proceden las células. En la siguiente sección se explicará el significado de cada una de estas letras.



Figura 3-2. Esquema de agrupaciones realizadas para el estudio del RPL. Las letras griegas (α , β , δ) se refieren al tipo de célula y/o tipo de estudio a realizar, mientras que las letras A, B, C y X a las agrupaciones finales de células.

3.3.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN CÉLULAS MONOCRISTALINAS (GRUPOS α Y β)

Las muestras que se han utilizado son células de silicio monocristalino de 125 mm de lado y 165 mm de diagonal. Su área total es de 154,7 cm².

Éstas son células comerciales de un suministrador especializado. La lista de parámetros eléctricos nominales de este tipo de células se muestra en la *Tabla 3-1*, donde ha sido remarcado, en negrita, el tipo de células utilizadas en este estudio.

Mono 125 mm, 165 \varnothing						
Eficiencia [%]	P _m [W]	V _{mp} [V]	I _{mp} [A]	V _{oc} [V]	I _{sc} [A]	Rango de clasificación en eficiencia [%]
18,00	2,79	0,515	5,412	0,63	5,67	±0,25
17,75	2,75	0,515	5,336	0,62	5,68	±0,25
17,50	2,71	0,515	5,261	0,62	5,60	±0,25
17,25	2,67	0,515	5,186	0,62	5,52	±0,25
17,00	2,63	0,515	5,111	0,62	5,44	±0,25
16,75	2,59	0,515	5,036	0,62	5,36	±0,25

Tabla 3-1. Tabla de clasificación estándar del suministrador de células. En negrita se remarca el tipo de células utilizadas en este estudio.

La eficiencia de célula elegida para hacer el estudio es de 17,75%. Posteriormente, con dichas células, se han fabricado módulos de 72 células en serie en configuración 6x12 (consistente en 6 tiras de 12 células). La fabricación de las células ha seguido los procesos convencionales de fabricación detallados en el Anexo B, mientras que los módulos se han fabricado según los procesos descritos en el Anexo C.

Para una eficiencia determinada, las células fueron medidas y subdivididas en tres agrupaciones A, B y C de acuerdo a su I_{sc} (grupo α), en un caso, y a su I_{mp} (grupo β) en otro. Buscando tener dispersiones mayores del parámetro considerado en cada agrupación, se formó una cuarta agrupación, denominada X, mediante la mezcla,

intencionada y una a una, de un cierto número de células procedentes de la agrupación con corriente más alta (A) y la más baja (C). De esta manera se asegura el tener agrupaciones con desviaciones estándar distintas. Se espera que la agrupación X tenga una desviación estándar mayor a la de todo el grupo, mientras que las agrupaciones A, B y C tendrán una desviación estándar menor.

Posteriormente, se fabricaron módulos de 72 células con cada una de las agrupaciones independientes. El proceso completo se encuentra esquematizado en la Figura 3-1.

En otros trabajos se define el RPL como la diferencia de potencia entre el sistema formado por la asociación de células y la suma de la potencias de las células individuales [65]. Sin embargo en este estudio, debido a la dificultad de intervenir en una producción en masa, o posibilidad de roturas en el momento de hacer la soldadura y al número tan elevado de muestras utilizadas, no es posible conocer exactamente las células que hay dentro de cada módulo para poder realizar la suma de sus potencias y compararla con la del módulo fabricado. Sin embargo, sí se han acotado todos los parámetros eléctricos de las células existentes en cada agrupación y por tanto su desviación estándar. Esto hace que el estudio desarrollado requiera una aproximación al problema con métodos estadísticos simples. Así, el RPL fue definido y calculado según la siguiente ecuación:

$$\overline{RPL_E} = \frac{N \cdot P_{max} - P_{mod}}{N \cdot P_{max}} \quad (3.5)$$

donde

P_{max} \equiv Promedio de la potencia máxima individual, P_m , de las células de una determinada agrupación

P_{mod} \equiv Promedio de potencia máxima de los módulos fabricados con las células de una determinada agrupación

$N \equiv$ Número de células en serie dentro de cada módulo.

Hay que entender este $\overline{RPL_E}$ como un promedio de los RPL individuales de cada módulo, como se explicará en el apartado 3.4.2.

En cuanto a la fabricación de módulos (Anexo C) es de destacar que:

- a) Los equipos de medida de células y de módulos utilizados son simuladores solares con clasificación AAA (de acuerdo con la norma IEC 60904-9:2007 [58]).
- b) Todos los módulos fueron fabricados con los mismos materiales, las mismas máquinas y las mismas condiciones de proceso.
- c) Todo módulo que presentara problemas en el control de calidad de inspección por termografía infrarroja (células rotas, soldaduras resistivas, puntos calientes) o en la curva I-V del simulador solar (principalmente escalones en la curva) fue rechazado para nuestro estudio, con el objeto de no llegar a conclusiones erróneas debidas a fallos en el proceso de fabricación.

3.3.2.1. Clasificación según I_{sc} . Subgrupo $\alpha 1775$

En este caso, fueron utilizadas aproximadamente 2300 células. Las células fueron medidas en el *cell tester* y clasificadas según su corriente en corto circuito, I_{sc} , en tres agrupaciones distintas A, B y C. El esquema de la *Figura 3-3* muestra como se hizo la clasificación.

Como se puede observar, cada rango de I_{sc} es de 0,12 A. Se ha obtenido este valor tras dividir el rango total de dispersión habitual en I_{sc} entre 3, por ser tres las agrupaciones de clasificación que se han definido (A, B, C).

Por otro lado, se ha creado artificialmente otra agrupación por medio de la mezcla de células provenientes de A y de C con el fin de aumentar significativamente la dispersión en I_{sc} . Debido a las características la línea de producción de módulos, la mezcla de células se ha realizado una a una. Así nos aseguramos de obtener, dentro de

cada módulo, un 50% de células de la agrupación A y un 50% de la agrupación C. A esta última agrupación se la identificará con la letra X.

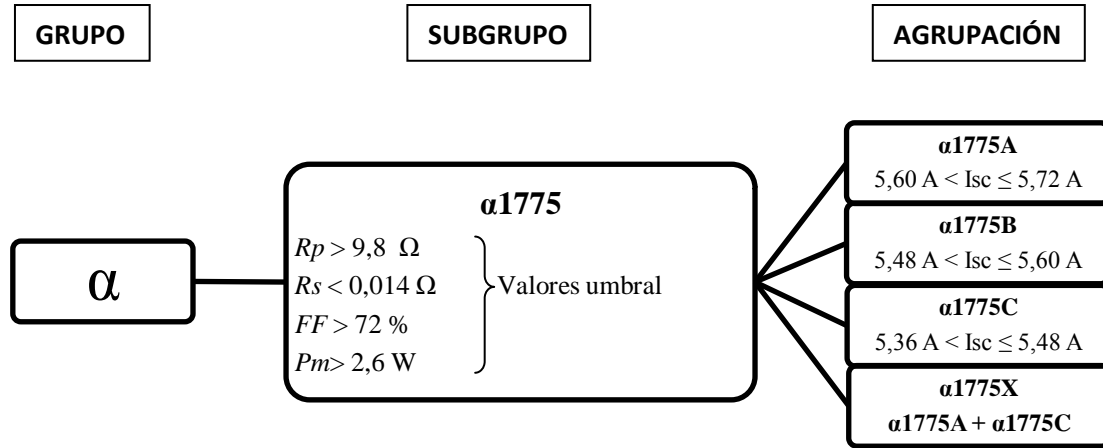


Figura 3-3. Esquema de clasificaciones del grupo α compuesto por células monocristalinas

En este estudio, además de la clasificación atendiendo a la I_{sc} , se fijaron unos valores umbrales de resistencia paralelo (R_p), de resistencia serie (R_s), de *Fill Factor* (FF) y potencia máxima (P_m). Cualquier célula con alguno de sus parámetros eléctricos fuera del valor umbral será rechazada y no será empleada en el experimento (ver Figura 3-3). Con esto se pretende minimizar la influencia de otros parámetros eléctricos, distintos de I_{sc} y I_{mp} , que pudieran alterar los resultados.

En la Tabla 3-2 se muestran las desviaciones estándar de la potencia P_m , de la corriente en el punto de máxima potencia, I_{mp} , y de la corriente de cortocircuito, I_{sc} , de todo el grupo de células tal y como vienen del suministrador después de ser medidas en el *cell tester*.

$\alpha 1775$	Desviación estándar
P_m	0,035 W
I_{mp}	0,050 A
I_{sc}	0,056 A

Tabla 3-2. Desviaciones estándar de los principales parámetros eléctricos de las células comerciales de eficiencia 17,75% tal y como vienen del suministrador

Las medidas de I_{sc} de cada célula obtenidas por el *cell tester* están representadas en la gráfica de la *Figura 3-4*. Éstas han sido filtradas según la agrupación $\alpha 1775A$, $\alpha 1775B$, $\alpha 1775C$, por lo que en dicha gráfica aparecen diferenciados los distintos rangos de I_{sc} .

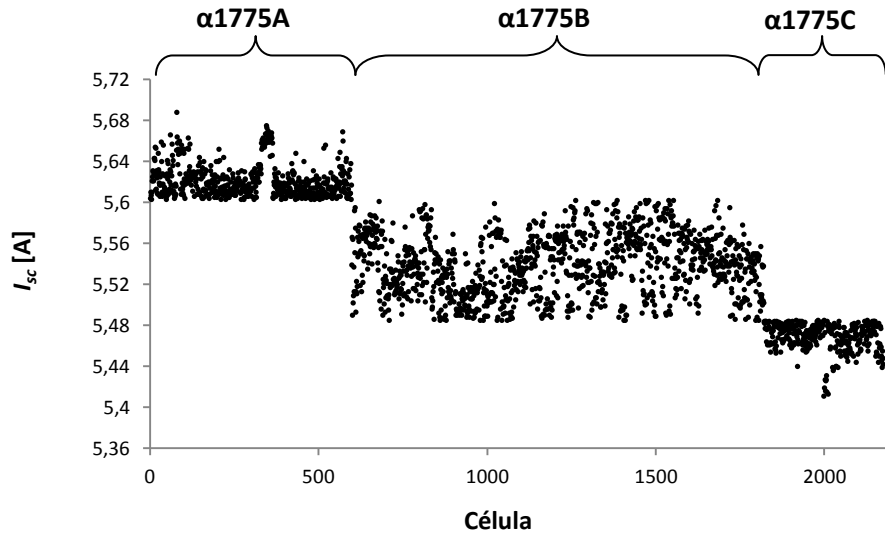


Figura 3-4. Valores de I_{sc} de las células pertenecientes al subgrupo $\alpha 1775$. Las clasificaciones en las agrupaciones A, B y C pueden diferenciarse claramente.

Atendiendo al mismo filtro que el utilizado en la gráfica anterior, las gráficas de la *Figura 3-5* muestran la dispersión en P_m y I_{mp} .

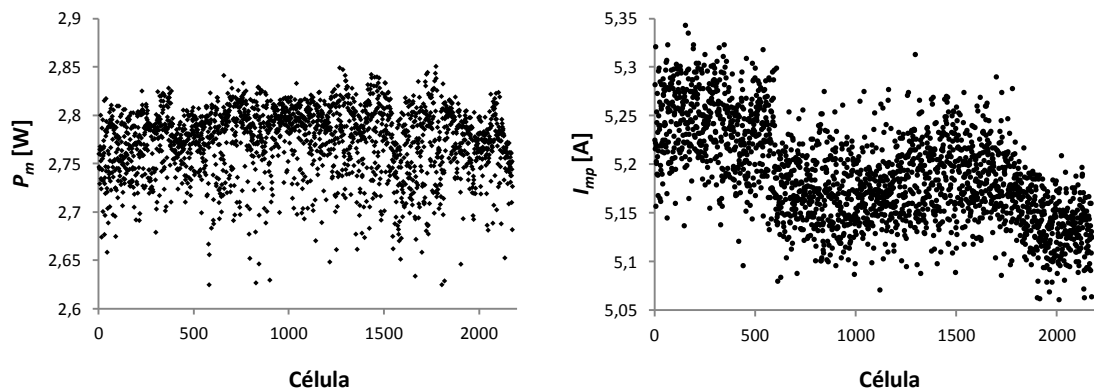


Figura 3-5. Izquierda: Valores de P_m en el subgrupo $\alpha 1775$. Derecha: valores de I_{mp} en subgrupo $\alpha 1775$.

A partir de las gráficas de la *Figura 3-4* y *Figura 3-5*, se concluye que, mientras que la I_{mp} conserva una distribución parecida a la I_{sc} , la distribución de la potencia máxima parece ser independiente de la dos anteriores.

Para el caso de la agrupación $\alpha 1775X$ se obtienen los resultados mostrados en la *Figura 3-6*:

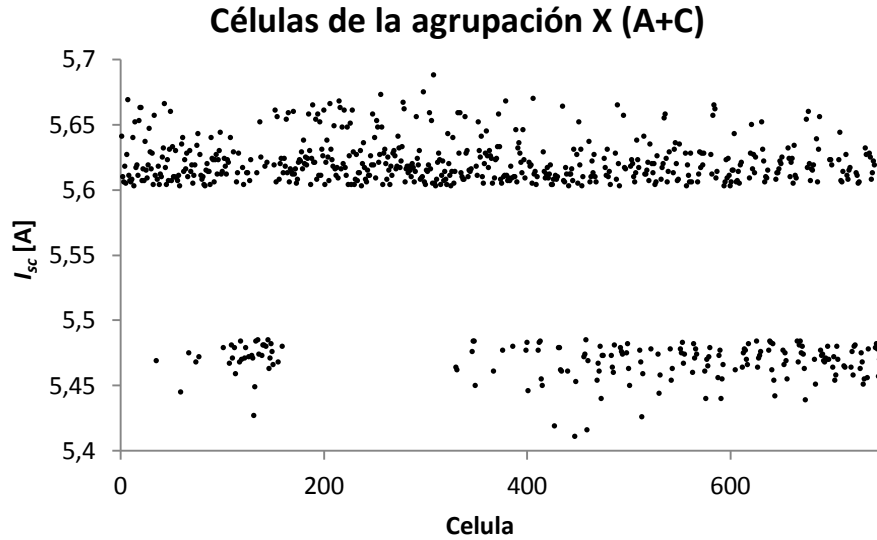


Figura 3-6. Valores de I_{sc} medidos sobre las células de la agrupación $\alpha 1775X$ resultante de las mezclas de células provenientes de las agrupaciones $\alpha 1775A$ y $\alpha 1775C$

En la *Tabla 3-3* se muestran los valores promedios y la desviación estándar de los parámetros de cada agrupación. En **negrita** aparece resaltado el parámetro utilizado para la clasificación de las células.

		P_m [W]	I_{mp} [A]	I_{sc} [A]
$\alpha 1775A$	Promedio	2,723	5,239	5,622
	σ	0,041	0,040	0,016
$\alpha 1775B$	Promedio	2,727	5,178	5,539
	σ	0,033	0,037	0,029
$\alpha 1775C$	Promedio	2,723	5,138	5,469
	σ	0,028	0,028	0,013
$\alpha 1775X$	Promedio	2,723	5,201	5,565
	σ	0,037	0,061	0,075

*Tabla 3-3. Promedio y desviación estándar de los parámetros eléctricos de células del subgrupo $\alpha 1775$. En **negrita** se resalta el parámetro utilizado para la clasificación.*

El voltaje en el punto de máxima potencia de todas las agrupaciones es de $V_{mp} = (0,525 \pm 0,005)$ V y el voltaje en circuito abierto $V_{oc} = (0,629 \pm 0,001)$ V.

Esta tabla confirma que se ha conseguido reducir la desviación estándar de I_{sc} de todo el grupo, desde 0,056 A (ver *Tabla 3-2*) hasta un valor de 0,013 A, para el caso de la agrupación C. Mientras que en el caso de la agrupación mezcla, X, se tiene un valor muy superior (0,075 A). Para las agrupaciones puras A, B y C, se observa que la B posee una desviación estándar apreciablemente mayor a A y C. Esto se puede ver en la *Figura 3-4*, donde, aunque las bandas de clasificación tienen el mismo ancho (0,12 A), las células de agrupaciones A y C se concentran cerca de los límites de banda. Por otro lado la mezcla de células no ha provocado un cambio apreciable en la desviación estándar de P_m .

Una vez formadas las agrupaciones de células según su I_{sc} (A, B, C y X), estas son introducidas en la línea de fabricación para hacer módulos con células procedentes de cada una de las ellas.

3.3.2.2. Medida de módulos con células del subgrupo $\alpha 1775$

Como se ha explicado en la sección 3.3.2.1, la agrupación $\alpha 1775X$ está formada por células con una dispersión alta en I_{sc} y en I_{mp} (esta última como consecuencia de la mezcla), con lo que cabría esperar una P_{mod} más baja para la agrupación X, como efectivamente ocurre (ver columna P_{mod} de la *Tabla 3-4*). Por otro lado, cabría esperar que las agrupaciones con mayor I_{sc} den lugar a un promedio de potencia de módulo mayor. Sin embargo esto no ocurre así. Además, las potencias de módulo obtenidas son muy parecidas.

Para estudiar la influencia de la dispersión en I_{sc} , se ha calculado el promedio de RPL de cada una de las agrupaciones según la fórmula (3.5) expresada en tanto por ciento:

$$\overline{RPL}_E \% = 100 \times \frac{P_{max} * 72 - P_{mod}}{P_{max} * 72} \quad (3.6)$$

El RPL definido de esta manera es en realidad un promedio de los RPL individuales de cada módulo, como se puede ver en la sección 3.4.2.

La pérdida de potencia de célula a módulo (también definida como pérdidas por encapsulado, PPE) está comprendida también en el RPL_E . Esta pérdida se debe principalmente al aumento de la resistencia serie (R_s) debido a la conexión, aunque la absorción de radiación en el EVA y en el vidrio también contribuye a la pérdida de potencia. La lámina posterior o *backsheet* también tiene una influencia en el cambio de potencia de la célula aislada y el módulo al que pertenece. Este efecto es, en cambio, contrapuesto a los dos anteriores, es decir contribuye a aumentar la potencia generada por las células encapsuladas. El mecanismo consiste en que la luz que pasa entre las células es reflejada por la lámina posterior en dirección al vidrio, que a su vez, la vuelve a reflejar (en un determinado porcentaje) de nuevo a las células.

Debido a esto, no es posible conocer el RPL exclusivamente vinculado a la asociación de células, pero sí se puede comparar el RPL entre agrupaciones y vincular la diferencia de RPL_E entre ellas a la dispersión (o desviación estándar) de I_{sc} .

La *Tabla 3-4* relaciona los resultados obtenidos en célula, con aquellos obtenidos en módulo separados por agrupaciones:

		Célula			Módulo	$\overline{RPL}_E\%$
		$P_m * 72$ [W]	I_{mp} [A]	I_{sc} [A]	P_{mod} [W]	
$\alpha 1775A$	Promedio	$196,1 \pm 0,4$	$5,24 \pm 0,01$	$5,62 \pm 0,01$	$191,5 \pm 0,6$	$2,3 \pm 0,3$
	σ (de célula)	0,041	0,040	0,016	$M=6$	
$\alpha 1775B$	Promedio	$196,3 \pm 0,4$	$5,18 \pm 0,01$	$5,54 \pm 0,01$	$191,5 \pm 0,4$	$2,5 \pm 0,3$
	σ (de célula)	0,033	0,037	0,029	$M=14$	
$\alpha 1775C$	Promedio	$196,1 \pm 0,4$	$5,14 \pm 0,01$	$5,47 \pm 0,01$	$191,4 \pm 0,9$	$2,3 \pm 0,3$
	σ (de célula)	0,028	0,028	0,013	$M=3$	
$\alpha 1775X$	Promedio	$196,1 \pm 0,4$	$5,20 \pm 0,01$	$5,56 \pm 0,01$	$191,3 \pm 0,3$	$2,4 \pm 0,3$
	σ (de célula)	0,037	0,061	0,075	$M=8$	

*Tabla 3-4. $\overline{RPL}_E\%$, promedios y desviaciones estándar de parámetros eléctricos de las agrupaciones del subgrupo $\alpha 1775$. La columna $P_m * 72$ representa el promedio de las células de la agrupación multiplicado por las 72 células que tiene un módulo. Los errores han sido obtenidos según se describe en el Anexo A. En cada caso la M indica el número de módulos fabricados.*

En la *Tabla 3-4* no se observa ninguna tendencia clara en la relación de desviación estándar de I_{sc} y $\overline{RPL_E}\%$. Por ejemplo, la agrupación B, que tiene una desviación estándar de I_{sc} menor que la X (mezcla de A y C) da lugar a un $\overline{RPL_E}\%$ mayor.

Para un aumento máximo de desviación estándar de I_{sc} de 0,059 A se han obtenido aumentos de $\overline{RPL_E}\%$ inferiores a 0,1 %. Esto se encuentra dentro del error de medida de los equipos y sus variaciones no pueden ser interpretadas como tendencias.

La desviación estándar en la corriente en el punto de máxima potencia, I_{mp} , y en la corriente de corto circuito, I_{sc} , de todas las células procedentes de $\alpha 1775$ sin clasificar está próxima a 0,05 A (ver *Tabla 3-2*). Se puede observar que al aumentar la desviación estándar de I_{sc} (mediante la mezcla de A y C) de 0,016 A a 0,075 A (un valor superior al del grupo según llega del suministrador), el aumento del $\overline{RPL_E}\%$ es, tan solo, de 0,08%. Con lo que se puede concluir que la dispersión de una clasificación típica comercial no provoca un aumento del RPL apreciable en comparación con subdividir dicha clasificación en otras tres de una desviación estándar mucho menor.

Es necesario indicar que no todos los suministradores son iguales, y que aunque la tolerancia de clasificación nominal sea la misma, se pueden recibir desviaciones estándar muy diferentes para distintos suministradores, e incluso se dan casos de lotes de células con desviaciones estándar muy diferentes aún perteneciendo al mismo suministrador. La medida previa y clasificación es un buen método para el caso de suministros con parámetros eléctricos muy dispersos.

3.3.2.3. Clasificación según I_{mp} . Subgrupo $\beta 1775$

Complementando el estudio anterior de la dispersión en I_{sc} , para relacionar la dispersión en I_{mp} con el RPL, se utilizaron células del mismo tipo y eficiencia que en el punto anterior (*Figura 3-7*). La metodología empleada fue la misma; las células fueron medidas en el *cell tester* y clasificadas en tres agrupaciones distintas (A, B y C), pero en

este caso, según su corriente en el punto de máxima potencia (I_{mp}). A este grupo de células se le denominará grupo β , seguido de su eficiencia en enteros: $\beta 1775$.

Los métodos de medida y fabricación de módulos han sido los mismos que los utilizados en el Capítulo 2 y que se explican con más detalle en el Anexo A y C.

El siguiente esquema sintetiza la clasificación realizada:

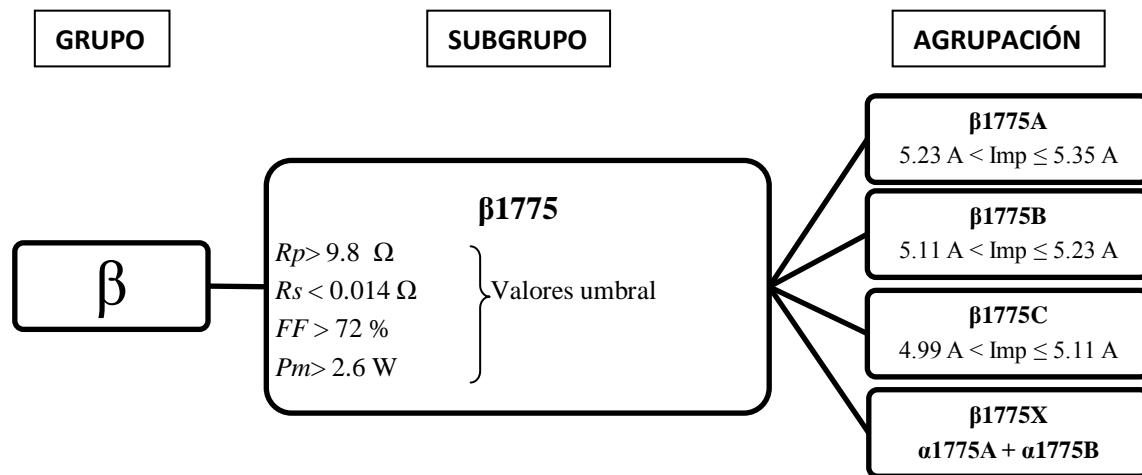


Figura 3-7. Esquema de clasificación del grupo β . compuesto por células monocristalinas.

Las desviaciones estándar de este grupo, tal y como vienen del suministrador y después de ser medidas en el *cell tester*, son:

$\beta 1775$	Desviación estándar
P_m	0,015 W
I_{mp}	0,041 A
I_{sc}	0,034 A

Tabla 3-5. Desviaciones estándar de los principales parámetros eléctricos de las células comerciales de eficiencia 17,75% tal y como vienen del suministrador

Tras ser medidas en el *cell tester*, se muestran en la *Figura 3-8* y *Figura 3-9*, los datos eléctricos de este grupo filtrando por su agrupación:

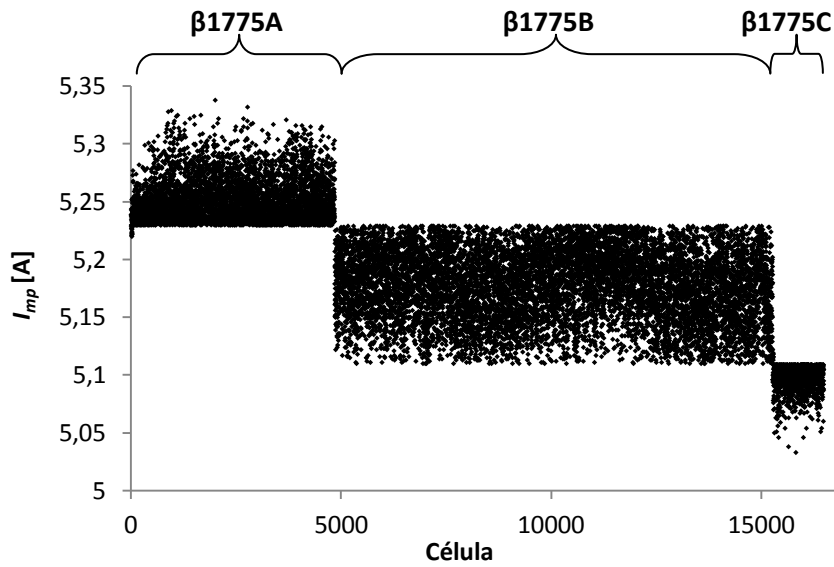


Figura 3-8. Valores de I_{mp} de las células pertenecientes al subgrupo $\beta 1775$. Las clasificaciones en las agrupaciones A, B y C pueden diferenciarse claramente.

Las medidas han sido filtradas según la agrupación ($\beta 1775A$, $\beta 1775B$, $\beta 1775C$) por lo que en la gráfica anterior aparecen diferenciados los distintos rangos de la corriente en el punto de máxima potencia, I_{mp} .

Utilizando el mismo filtro, para I_{sc} y P_m se obtiene:

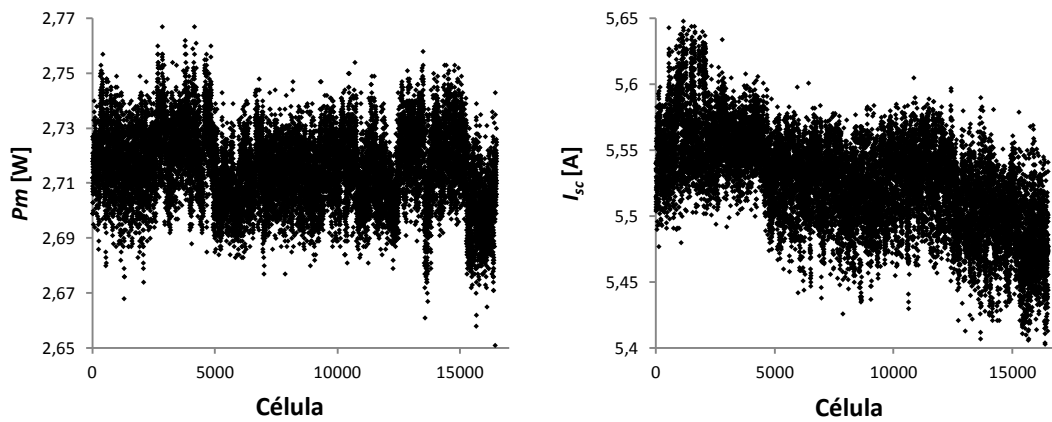


Figura 3-9. Izquierda: Valores de P_m del subgrupo $\beta 1775$. Derecha: valores de I_{sc} en subgrupo $\beta 1775$.

Para este grupo se vuelve a observar la misma dependencia entre I_{mp} e I_{sc} que en el grupo anterior. La dependencia entre P_m e I_{mp} es menos evidente.

Para el caso de la agrupación $\beta 1775X$, la distribución de la corriente I_{mp} presenta las don bandas correspondientes a los grupos de los que procede:

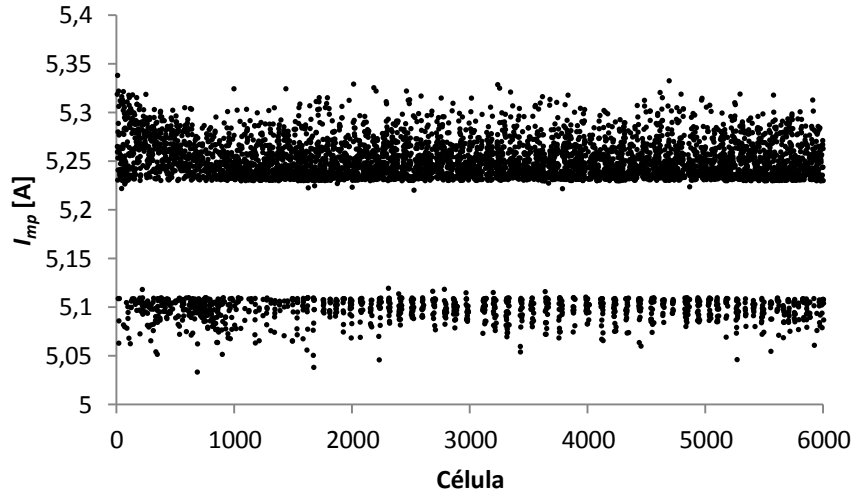


Figura 3-10. Valores de I_{mp} medidos sobre las células de la agrupación $\beta 1775X$ resultante de las mezclas de células provenientes de las agrupaciones $\beta 1775A$ y $\beta 1775C$

Siendo los parámetros eléctricos de cada una de las agrupaciones por separado los de la Tabla 3-6:

		P_m [W]	I_{mp} [A]	I_{sc} [A]
$\beta 1775A$	Promedio	2,721	5,252	5,557
	σ	0,013	0,019	0,026
$\beta 1775B$	Promedio	2,715	5,177	5,519
	σ	0,012	0,030	0,029
$\beta 1775C$	Promedio	2,701	5,098	5,477
	σ	0,013	0,013	0,030
$\beta 1775X$	Promedio	2,717	5,221	5,541
	σ	0,015	0,064	0,041

Tabla 3-6. Promedio y desviación estándar de los parámetros eléctricos de células del subgrupo $\beta 1775$.

El voltaje en el punto de máxima potencia de todas las agrupaciones ha sido $V_{mp} = (0,523 \pm 0,006)$ V y el voltaje en circuito abierto $V_{oc} = (0,629 \pm 0,001)$ V.

3.3.2.4. Medida de módulos con células del grupo $\beta 1775$

Al igual que en la agrupación anterior, se han medido los módulos a una temperatura de 25°C y se han rechazado aquellos que presentaban algún defecto en el control de inspección por termografía infrarroja o con defectos en la curva I-V (escalón). El objeto de este rechazo es que no influya ningún defecto de fabricación (tales como roturas en células, malas soldaduras que incrementen la resistencia serie, etc).

Los resultados eléctricos de célula y módulo, así como el RPL se expresan en la siguiente tabla:

		Célula			Módulo	$\overline{RPL}_E\%$
		$P_m * 72$ [W]	I_{mp} [A]	I_{sc} [A]	P_{mod} [W]	
$\beta 1775A$	Promedio	$195,9 \pm 0,4$	$5,25 \pm 0,01$	$5,56 \pm 0,01$	$192,3 \pm 0,6$	$1,9 \pm 0,3$
	σ (de célula)	0,013	0,019	0,026	$M=8$	
$\beta 1775B$	Promedio	$195,5 \pm 0,4$	$5,18 \pm 0,01$	$5,52 \pm 0,01$	$193,2 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,3$
	σ (de célula)	0,012	0,030	0,029	$M=34$	
$\beta 1775C$	Promedio	$194,5 \pm 0,4$	$5,10 \pm 0,01$	$5,48 \pm 0,01$	$191,8 \pm 0,5$	$1,4 \pm 0,3$
	σ (de célula)	0,013	0,013	0,030	$M=7$	
$\beta 1775X$	Promedio	$195,6 \pm 0,4$	$5,22 \pm 0,01$	$5,54 \pm 0,01$	$192,1 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,3$
	σ (de célula)	0,015	0,064	0,041	$M=15$	

Tabla 3-7. $\overline{RPL}_E\%$, promedios y desviaciones estándar de parámetros eléctricos de las agrupaciones del subgrupo $\beta 1775$. La columna $P_m * 72$ representa el promedio de las células de la agrupación multiplicado por las 72 células que tiene un módulo. Los errores han sido obtenidos según se describe en el Anexo A. En cada caso la M indica el número de módulos fabricados.

A continuación (Figura 3-11) se representa el $\overline{RPL}_E\%$ en función de la desviación típica de la I_{sc} y de la I_{mp} . Se puede ver que en este experimento, ha vuelto a aumentar la desviación estándar de la I_{mp} al hacer la mezcla de células procedentes de A y C. En cambio, ha aumentado muy poco la desviación estándar de I_{sc} y mucho menos la desviación estándar de P_m .

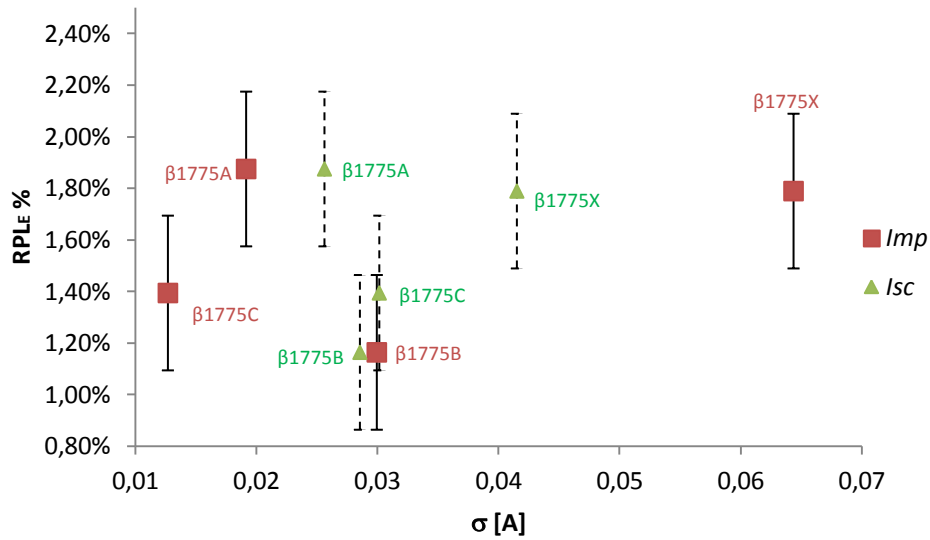


Figura 3-11. RPL_E en función de la desviación estándar de I_{sc} y de I_{mp}

Por otro lado los resultados arrojan las mismas conclusiones que en el grupo α : para este tipo de células y módulos la dispersión conseguida no refleja aumentos de RPL debidos a ella. Así, aunque es previsible que exista algún efecto de la dispersión sobre el RPL, éste se puede ver “camuflado” por las Perdidas Por Encapsulado (PPE), principalmente las debidas al aumento de la resistencia serie por la conexión en serie de las células. A estas pérdidas, que están comprendidas dentro de las PPE, se les llamará Perdidas Por R_s (PPRs). Las PPRs, para una misma sección de cinta de conexión y un mismo número de células, son mayores cuanto mayor es la potencia de las células.

Para minimizar el efecto de las PPRs se debe realizar el estudio de la dispersión en I_{sc} e I_{mp} utilizando células de menor potencia. Por otro lado se intentará conseguir una población de células con una dispersión mayor. Este será el objeto de la siguiente sección.

3.3.3. RESULTADOS OBTENIDOS EN CÉLULAS MULTICRISTALINAS

(GRUPO δ)

Como ya se ha visto en la sección anterior, la dispersión proveniente de células comerciales con una tolerancia de clasificación típica de $\pm 0,04$ W (ver Tabla 3-1) no es suficiente para poder ver una relación directa entre desviación estándar y RPL. Por ese motivo fue necesario incrementar artificialmente la desviación estándar creando una agrupación mezcla; la agrupación X. Aún así, no se pudo encontrar una dependencia clara, por tanto, para obtener dispersiones aún mayores que las obtenidas en los experimentos anteriores, se ha recurrido a otro tipo de muestras (células de silicio multicristalino).

3.3.3.1. Procedimiento y resultados

Las muestras que se han utilizado en esta sección son células de silicio multicristalino de 125x125 mm (área 156,2 mm²), que se han fabricado mediante un proceso estándar de fabricación descrito en el Anexo B.

En este caso, ha sido necesario hacer una clasificación previa en potencia, ya que las distintas eficiencias de células fueron mezcladas en origen, con lo que se desconocían sus datos eléctricos y clasificaciones. Así, para el estudio del presente grupo de células, denominado grupo δ , fueron medidas un total de 8300 células y clasificadas en dos subgrupos distintos según su potencia, (que son el $\delta 1457$ y $\delta 1423$). Posteriormente las células de cada subgrupo fueron subdivididas en función de su corriente de cortocircuito (I_{sc}) formando así las agrupaciones (ver esquema de la *Figura 3-12*). Las agrupaciones serán etiquetadas por las letras A, B y C, siendo $\delta 1457A$ la agrupación con la I_{sc} más alta.

El procedimiento de medida de células y módulos, así como la fabricación de estos últimos es el que se describe en el Anexo C.

3.3.3.2. Clasificación según P_m . Grupo δ

Cada una de las células utilizadas para este experimento fue también medida individualmente. La gráfica de la *Figura 3-13* muestra la potencia de cada célula. En el eje x se encuentra representada cada una de las 8300 células mientras que en el eje y se representa su potencia. Dentro de la gráfica las células han sido agrupadas por subgrupos.

Para este tipo de células, además de la clasificación atendiendo a la I_{sc} y P_m , se fijaron unos valores umbral de resistencia paralelo (R_p), de resistencia serie (R_s) y de *Fill Factor* (FF). Cualquier célula con alguno de sus parámetros eléctricos fuera del valor umbral será rechazada y no será empleada en el experimento (ver *Figura 3-12*).

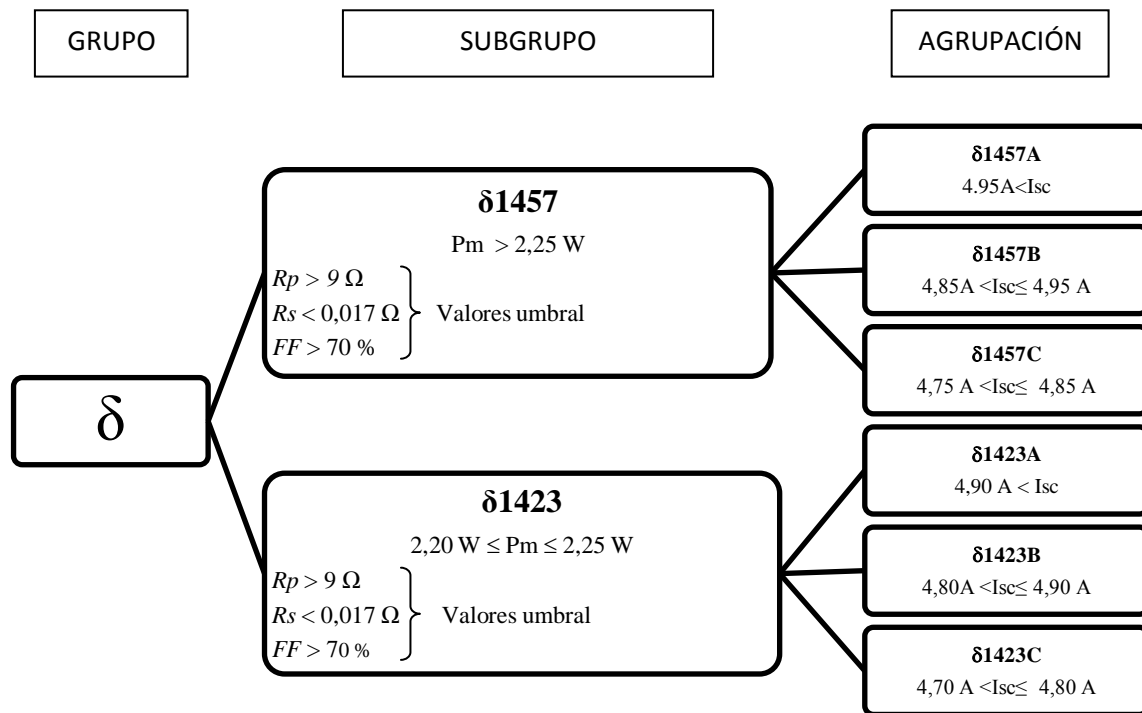


Figura 3-12. Esquema de clasificación del grupo δ compuesto por células multicristalinas

La clasificación del grupo $\delta 1457$ no posee una cota superior de potencia, de ahí que su dispersión en P_m sea mayor, como se puede observar en la gráfica de la *Figura 3-13*. Sin embargo el otro subgrupo ha sido sujeto a una clasificación definida por unas cotas superior e inferior y con un rango de potencia de 0,05 W.

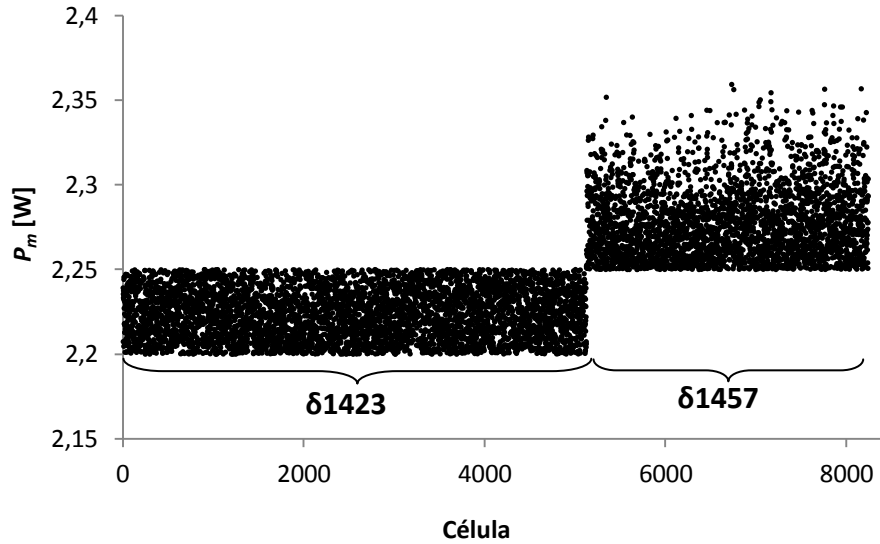


Figura 3-13. Valores de P_m perteneciente a los dos subgrupos de δ

Clasificación según I_{sc} : Subgrupo $\delta 1457$

Tras ser medidas y clasificadas las células según su I_{sc} , se obtiene la distribución mostrada en la gráfica de la Figura 3-14:

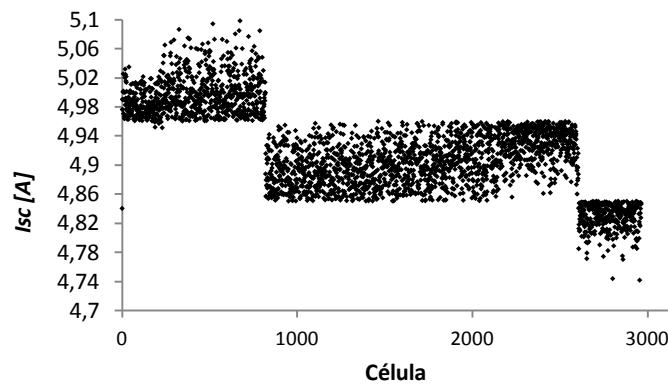


Figura 3-14. Valores de I_{sc} de las tres agrupaciones (A, B y C) del subgrupo $\delta 1457$

Utilizando la misma ordenación que en la gráfica anterior, en las gráficas de la Figura 3-15 se observa la distribución de P_m y de I_{mp} :

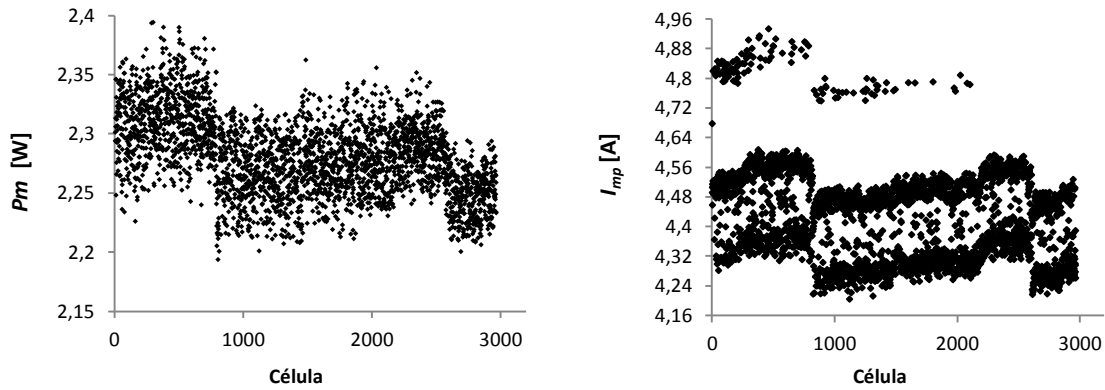


Figura 3-15. Izquierda: Valores de P_m en el subgrupo $\delta 1457$. Derecha: valores de I_{mp} en subgrupo $\delta 1457$.

Sorprende que para este subgrupo, $\delta 1457$, se tiene una distribución de I_{mp} en dos bandas más un pequeño grupo de células con una I_{mp} mucho mayor. Esta distribución no es apreciable, sin embargo, en las gráficas de I_{sc} y de P_m .

Por otro lado se puede observar en las gráficas de la Figura 3-14 y Figura 3-15, que los escalones provocados por la clasificación en I_{sc} se aprecian también para P_m y la I_{mp} . En los grupos α y β de la sección 3.3.2 (formados por células monocristalinas), esta dependencia fue sólo observada entre los parámetros I_{sc} e I_{mp} .

Las desviaciones estándar para este grupo son:

Grupo δ	Desviación estándar
P_m	0,042 W
I_{mp}	0,106 A
I_{sc}	0,066 A

Tabla 3-8. Desviaciones estándar de los principales parámetros eléctricos de las células comerciales multicristalinas pertenecientes al grupo δ

Comparando estas desviaciones estándar con las obtenidas para los grupos α y β (tablas Tabla 3-2 y Tabla 3-5) se puede ver que se han obtenido dispersiones mayores.

En la Tabla 3-9 se resumen los parámetros eléctricos del subgrupo $\delta 1457$:

		P_m [W]	I_m [A]	I_{sc} [A]
$\delta 1457A$	Promedio	2,309	4,508	4,995
	σ	0,031	0,141	0,028
$\delta 1457B$	Promedio	2,275	4,418	4,906
	σ	0,027	0,111	0,030
$\delta 1457C$	Promedio	2,247	4,362	4,829
	σ	0,019	0,096	0,018

Tabla 3-9. Promedio y desviación estándar de los parámetros eléctricos de células del subgrupo $\delta 1457$

El voltaje en el punto de máxima potencia de todas las agrupaciones ha sido $V_{mp} = (0,514 \pm 0,001)$ V y el voltaje en circuito abierto $V_{oc} = (0,611 \pm 0,001)$ V.

La gráfica de la *Figura 3-16* muestra claramente una dependencia creciente de la potencia del módulo con el grado de la agrupación y por tanto con la corriente en cortocircuito, I_{sc} , de las células que conforman dicha agrupación.

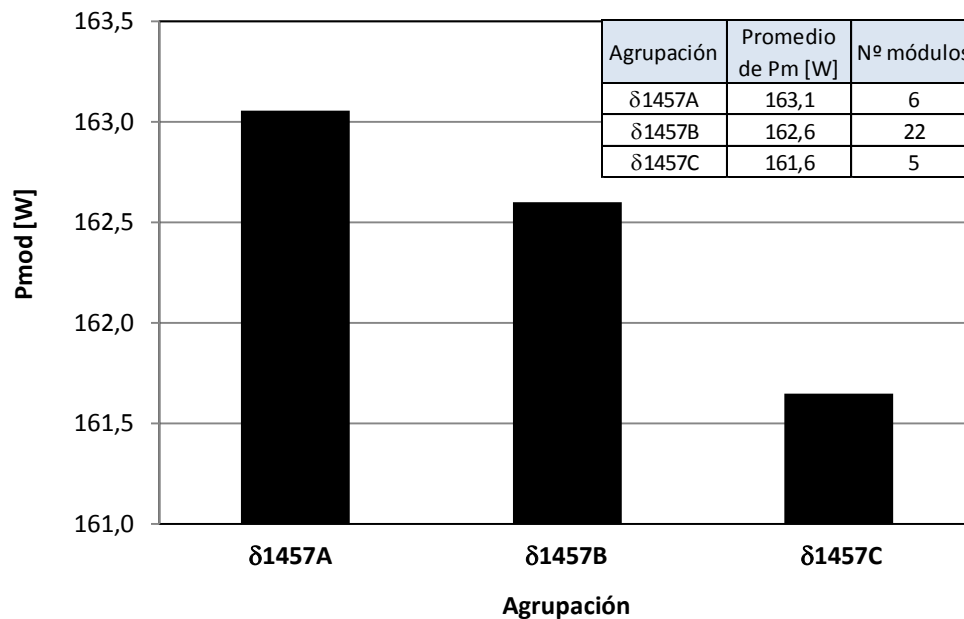


Figura 3-16. Potencia promedio de los módulos fabricados con células provenientes de cada agrupación del subgrupo $\delta 1457$. En la tabla insertada figura también el número de módulos fabricados.

A continuación se estudia el RPL del subgrupo $\delta 1457$:

		Células			Módulos	\overline{RPL}_E %
		$P_m * 72$ [W]	I_{mp} [A]	I_{sc} [A]	P_{mod} [W]	
$\delta 1457A$	Promedio	166,2 \pm 0,4	4,51 \pm 0,01	4,99 \pm 0,01	163,1 \pm 0,2	1,9 \pm 0,3
	σ (de célula)	0,031	0,141	0,028		
$\delta 1457B$	Promedio	163,8 \pm 0,4	4,418 \pm 0,009	4,91 \pm 0,01	162,6 \pm 0,2	0,7 \pm 0,3
	σ (de célula)	0,027	0,111	0,030		
$\delta 1457C$	Promedio	161,8 \pm 0,4	4,36 \pm 0,01	4,83 \pm 0,01	161,6 \pm 0,2	0,1 \pm 0,3
	σ (de célula)	0,019	0,096	0,018		

Tabla 3-10. RPL_E , promedios y desviaciones estándar de parámetros eléctricos de las agrupaciones del subgrupo $\delta 1457$. La columna $P_m * 72$ representa el promedio de las células de la agrupación multiplicado por las 72 células que tiene un módulo. Los errores han sido obtenidos según se describe en el Anexo A.

A diferencia de lo que ocurría con los grupos α y β , en este grupo se pueden ver agrupaciones en las que prácticamente no ha habido RPL (agrupación $\delta 1457C$). Esto puede explicarse por dos motivos:

- 1) El primero y más evidente es el error del equipo de medida, que principalmente se debe al error sistemático al realizar la calibración.
- 2) En el caso de los módulos procedentes del grupo δ , la potencia es mucho menor que la de los módulos de los grupos α y β . Sin embargo los materiales y el número de células empleadas para construirlos son los mismos. Particularmente la cinta de soldadura (*tab-ribbon*) utilizada para conectar las células entre sí, es del mismo material (cobre estañado) y de la misma sección (2x0,15) mm para todos los módulos. Por ser módulos con el mismo diseño y mismo número de células la longitud de la cinta es también la misma. Esto quiere decir que los mismos cables deben extraer más potencia en el caso de los módulos α y β que en los módulos δ , lo cual implica que la pérdida de potencia por efecto Joule es mayor en α y β y por tanto también lo es el RPL.

La representación gráfica de la tabla anterior (*Figura 3-17*) pone de manifiesto que el mayor cambio de desviación estándar se produce en la corriente en el punto de máxima potencia, I_{mp} , mientras que la desviación estándar de la corriente en corto

circuito, I_{sc} , varía muy poco. Tampoco se ha encontrado variación apreciable de la desviación estándar de la P_m por lo que por simplificación no ha sido representada.

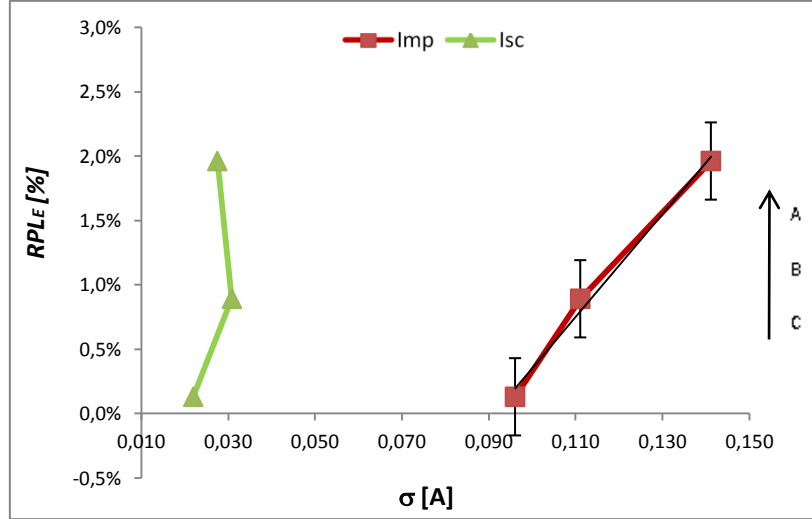


Figura 3-17. $\overline{RPL_E}\%$ en función de la desviación estándar de I_{sc} e I_{mp} . Subgrupo $\delta 1457$.

Mediante una aproximación lineal se puede establecer una relación simple entre $\sigma(I_{mp})$ y el $\overline{RPL_E}\%$ para este grupo. Así se obtiene:

$$\overline{RPL_E}\% = 40,69 \cdot \sigma(I_{mp}) - 3,80 \quad (3.7)$$

En términos de incrementos, la RPL se puede expresar según la ecuación (3.8). El error expresado viene determinado en el Anexo A y se debe principalmente al error sistemático de calibración de los equipos de media:

$$\frac{\Delta \overline{RPL_E}\%}{\Delta \sigma(I_{mp})} = (41 \pm 2) \% / A \quad (3.8)$$

Clasificación según I_{sc} . Subgrupo $\delta 1423$

Para el caso de células con potencia entre 2,20W y 2,25W se obtiene (ver Figura 3-18):

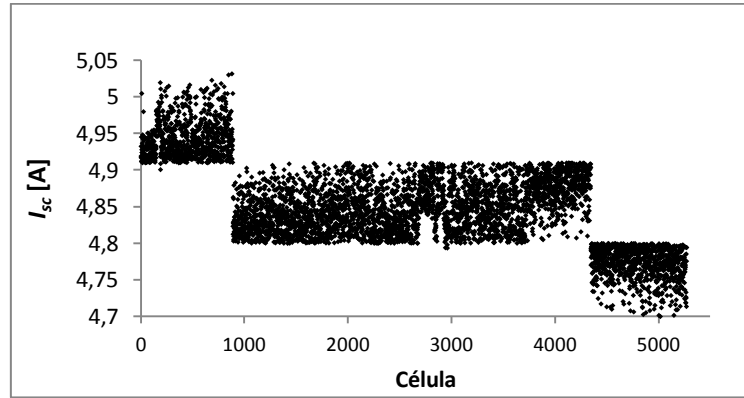


Figura 3-18. Valores de I_{sc} de las tres agrupaciones (A, B y C) del subgrupo $\delta 1423$

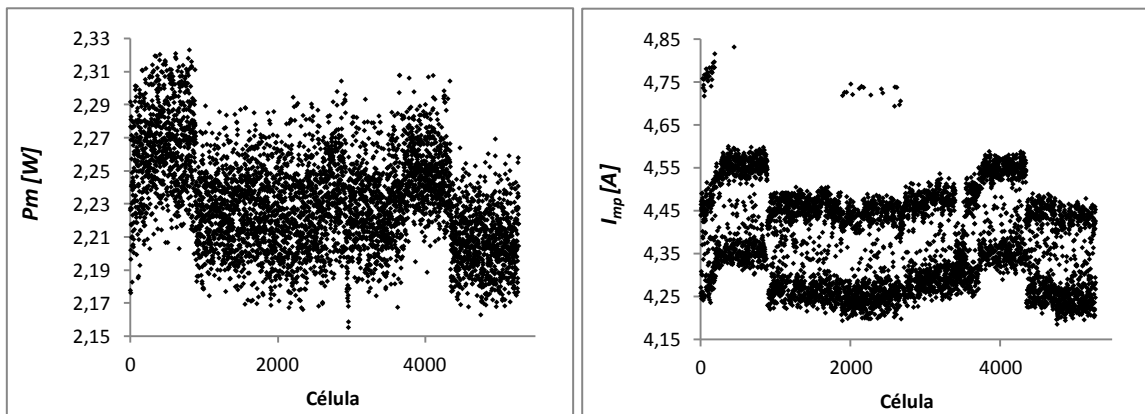


Figura 3-19. Izquierda: Valores de P_m en el subgrupo $\delta 1423$. Derecha: valores de I_{mp} en subgrupo $\delta 1423$.

Para este subgrupo, $\delta 1423$, se da el mismo caso que el anterior, $\delta 1457$, es decir, se vuelve a apreciar la misma dependencia entre los tres parámetros estudiados así como las dos bandas que conforman la distribución de I_{mp} .

Los datos eléctricos de este subgrupo son los siguientes:

		P_m [W]	I_{mp} [A]	I_{sc} [A]
δ1423A	Promedio	2,262	4,458	4,944
	σ	0,027	0,117	0,028
δ1423B	Promedio	2,231	4,378	4,850
	σ	0,025	0,106	0,031
δ1423C	Promedio	2,207	4,328	4,772
	σ	0,018	0,093	0,022

Tabla 3-11. Promedio y desviación estándar de los parámetros eléctricos de células del subgrupo δ1423

El voltaje en el punto de máxima potencia de todas las agrupaciones ha sido $V_{mp} = (0,509 \pm 0,001)$ V y el voltaje en circuito abierto $V_{oc} = (0,607 \pm 0,001)$ V.

Como en otros casos, la células fueron tomadas por agrupaciones y los módulos fueron fabricados con dichas células. Ninguna célula de agrupaciones distintas fue mezclada. Así se dan los siguientes resultados de potencia promedio de módulo:

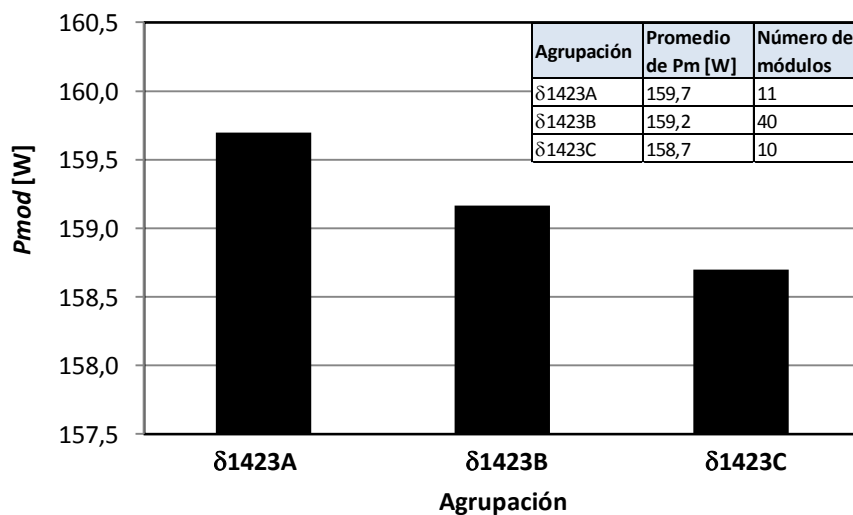


Figura 3-20. Potencia promedio de los módulos fabricados con células provenientes de cada agrupación del subgrupo δ1423. En la tabla insertada figura también el número de módulos fabricados.

Se vuelve a apreciar esa dependencia de la potencia de módulo con el grado de la agrupación, es decir cuanto mayor es el grado (mayor I_{sc}) mayor es la potencia promedio obtenida de los módulos fabricados con esas células.

El $\overline{RPL_E}\%$ resulta:

		Célula			Módulo	$\overline{RPL_E}\%$
		P_m*72 [W]	I_{mp} [A]	I_{sc} [A]	P_{mod} [W]	
$\delta 1423A$	Promedio	162,9 \pm 0,3	4,46 \pm 0,01	4,94 \pm 0,01	159 \pm 1	2,0 \pm 0,3
	σ (de célula)	0,027	0,117	0,028		
$\delta 1423B$	Promedio	160,6 \pm 0,3	4,38 \pm 0,01	4,85 \pm 0,01	159,2 \pm 0,5	0,9 \pm 0,3
	σ (de célula)	0,025	0,106	0,031		
$\delta 1423C$	Promedio	158,9 \pm 0,3	4,33 \pm 0,01	4,77 \pm 0,01	158,7 \pm 0,5	0,1 \pm 0,3
	σ (de célula)	0,018	0,093	0,022		

Tabla 3-12. $\overline{RPL_E}\%$, promedios y desviaciones estándar de parámetros eléctricos de las agrupaciones del subgrupo $\delta 1423$. La columna P_m*72 representa el promedio de las células de la agrupación multiplicado por las 72 células que tiene un módulo.

Al representar la desviación estandar con respecto al RPL, se observa una tendencia muy parecida a la observada para el subgrupo anterior (Figura 3-21).

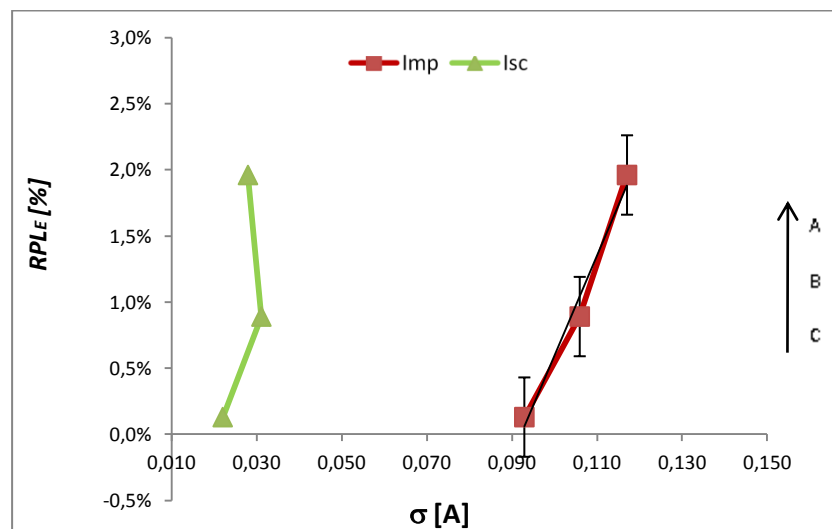


Figura 3-21. $\overline{RPL_E}\%$ en función de la desviación estándar de I_{sc} e I_{mp} . Subgrupo $\delta 1423$.

Al igual que en el subgrupo anterior, $\delta 1457$, se vuelve a encontrar una dependencia del $\overline{RPL_E}\%$ con respecto a la desviación estandar de I_{mp} y sin embargo no se encuentra una tendencia clara con respecto a las desviaciones estandar de P_m e I_{sc} . Para establecer una medida de la relación entre $\overline{RPL_E}\%$ e I_{mp} , se ha realizado un ajuste lineal de los datos obtenidos, cuyo resultado se recoge en la ecuación (3.9).

Su relación lineal es:

$$\overline{RPL_E}\% = 75,11 \cdot \sigma(I_{mp}) - 6,91 \quad (3.9)$$

Se puede expresar en modo incremental de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta \overline{RPL_E}\%}{\Delta \sigma(I_{mp})} = (75 \pm 3) \% / A \quad (3.10)$$

3.3.4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Como se ha comentado anteriormente, se pretende conocer la influencia de la dispersión de parámetros eléctricos de células en la potencia obtenida de módulo cuando este está fabricado con la asociación en serie de las mismas. En este sentido el trabajo realizado y las conclusiones se pueden resumir en los siguientes puntos.

- Los parámetros a estudiar han sido la corriente en corto circuito I_{sc} , la corriente en el punto de máxima potencia, I_{mp} y la potencia máxima P_m .
- Para conocer la relación entre el RPL y la desviación estándar de los parámetros P_m , I_{sc} e I_{mp} , se ha partido de dos tipos de células comerciales, monocristalinas y multicristalinas. Con ambos tipos de células se han hecho clasificaciones diferentes atendiendo a los tres parámetros mencionados. “A priori” la desviación estándar de las células es desconocida, siendo determinada una vez que las células son medidas.

3.3.4.1. Células monocristalinas (grupos α y β):

Para el caso de células **monocristalinas**, se han utilizado muestras comerciales de 125mm de lado y 17,75% de eficiencia (tal cuál vienen clasificadas del fabricante). Se han hecho dos clasificaciones distintas:

- a) La primera clasificación, α , ha consistido en subdividir el grupo de células en tres agrupaciones distintas de acuerdo a la I_{sc} . Las agrupaciones se han denominado $\alpha 1775A$, $\alpha 1775B$ y $\alpha 1775C$. Una cuarta agrupación, X, se ha formado mediante la mezcla de células provenientes de A y de C. Así, se aumenta deliberadamente la desviación estándar de I_{sc} para la agrupación X. Indirectamente, aunque en menor medida se ha aumentado la desviación estándar de I_{mp} (ver gráfica de la *Figura 3-22*).

b) La segunda clasificación, β , ha consistido en subdividir el grupo de células en tres agrupaciones distintas de acuerdo a la I_{mp} . Las agrupaciones se han denominado $\beta 1775A$, $\beta 1775B$ y $\beta 1775C$. Una cuarta agrupación, X, se ha formado mediante la mezcla de células provenientes de A y de C. De esta manera se aumenta deliberadamente la desviación estándar de I_{mp} para la agrupación X. Indirectamente, aunque en menor medida se ha aumentado la desviación estándar de I_{sc} (ver gráfica de la Figura 3-22).

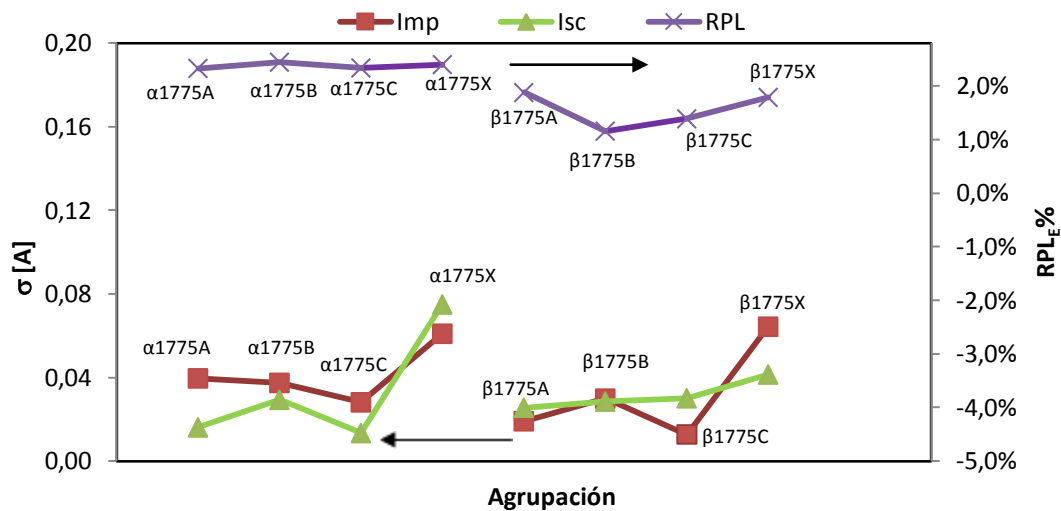


Figura 3-22. Comparación entre desviaciones estándar y $\overline{RPL}_E\%$ para los grupos α y β . Se puede ver cómo ha aumentado apreciablemente la $\sigma(I_{sc})$ y la $\sigma(I_{mp})$ para la agrupación X sin que ello haya derivado en un aumento detectable de la $\overline{RPL}_E\%$.

- Se han comparado las medidas eléctricas promedio de las células de cada agrupación con las de los módulos fabricados con las mismas, y se ha obtenido un valor de pérdida relativa de potencia, RPL, para cada agrupación.
- Se ha relacionado el RPL con la desviación estándar de las células de cada agrupación y se ha obtenido un valor cuantitativo de aumento de RPL con respecto al aumento de la desviación estándar. Al comparar variaciones de RPL entre agrupaciones se pretende dejar sin influencia las pérdidas por encapsulado, PPE, las cuales son iguales para distintas agrupaciones dentro del mismo grupo (ver sección 3.2).

· Para el caso de los grupos α y β , los resultados obtenidos están por debajo del error de los equipos de medida, con lo que es necesario investigar más en este campo y conseguir dispersiones aún mayores para conocer su influencia en el RPL. Se puede concluir, por tanto, que dada una clasificación estándar de células comerciales, una clasificación adicional, ya sea en I_{mp} o en I_{sc} , no reduce el RPL o lo hace en un porcentaje inferior al nivel de detección de los equipos utilizados.

3.3.4.2. Células multicristalinas (grupo δ):

Para el caso de células **multicristalinas** se han obtenido muestras de 125x125 mm de lado y de eficiencia indeterminada (se han mezclado en origen varias eficiencias). En este capítulo se pretendía aumentar la dispersión de los parámetros eléctricos mencionados dado que en los grupos α y β (sección 3.3.2) no se había logrado alcanzar desviaciones estándar suficientemente elevadas como para conocer su influencia en el $\overline{RPL_E}\%$.

· Para profundizar más en el estudio de la dispersión en I_{mp} , se midieron las células y se separaron previamente en función de su potencia en dos subgrupos (δ_{1457} y δ_{1423}) y posteriormente cada subgrupo se dividió en tres agrupaciones de acuerdo a la I_{sc} . Los resultados obtenidos muestran que se ha logrado aumentar la dispersión en I_{mp} de manera significativa (se han alcanzado desviaciones estándar hasta 2,7 veces mayores que para las obtenidas en la sección 3.3.2) y se ha observado y cuantificado una relación entre el RPL y el aumento de la desviación estándar.

· Como se explica en la página 106, las diferencias de $\Delta \overline{RPL_E}\%$ entre subgrupos, son mucho mayores dentro del grupo δ con respecto a los grupos α y β , sin embargo, se han obtenido $\overline{RPL_E}\%$ menores (incluso próximos a cero), lo que puede ser explicado con las diferentes PPE entre los dos tipos de módulos (fabricados con células multicristalinas y fabricados con células monocristalinas) además de por el error sistemático de calibración (ver Anexo A).

- En los subgrupos $\delta 1457$ y $\delta 1423$ se ha logrado obtener una variación de la desviación estándar de I_{mp} entre agrupaciones mientras que la desviación estándar de I_{sc} prácticamente no varía (Figura 3-23), pudiendo relacionar la variación de $\overline{RPL_E}\%$ con la variación en I_{mp} .

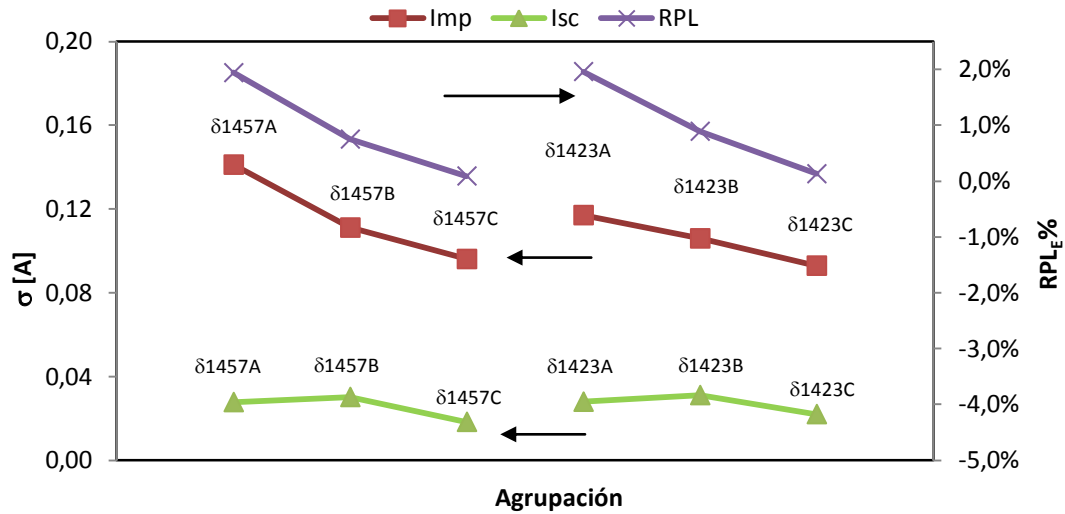


Figura 3-23. Comparación entre desviaciones estándar y $\overline{RPL_E}\%$ para el grupo δ . Se observa una variación de $\sigma(I_{mp})$ con la misma tendencia que la variación de $\overline{RPL_E}\%$. No se ha encontrado, sin embargo, variación con $\sigma(I_{sc})$.

- Se ha llegado a una expresión lineal de la dependencia obtenida entre el cambio de desviación estándar y RPL para estos dos subgrupos:

$$\text{Para el subgrupo } \delta 1457: \frac{\Delta \overline{RPL_E}\%}{\Delta \sigma(I_{mp})} = (41 \pm 2) \% / A$$

$$\text{Para el subgrupo } \delta 1423: \frac{\Delta \overline{RPL_E}\%}{\Delta \sigma(I_{mp})} = (75 \pm 3) \% / A$$

- Se puede advertir que se han obtenido dos valores de dependencia distintos entre el $\overline{RPL_E}$ y la desviación estándar de I_{mp} . Esto está en concordancia con la ecuación de Bucciarelli, en la que el RPL no sólo depende de la desviación estándar de los parámetros eléctricos sino también del parámetro de calidad de la célula, C (ver

ecuación (3.2)). Sin embargo hay que tener en cuenta que sólo se cuenta con tres puntos de esta función y que la dependencia podría no ser lineal. Sería necesario investigar más en este sentido.

· Por otro lado, habiéndose obtenido variaciones similares de la desviación estándar, σ , en células monocristalinas y multicristalinas, estas variaciones no han dado lugar a un cambio detectable del RPL en las células monocristalinas, mientras que sí lo ha hecho en las multicristalinas. Esto podría deberse a la influencia del valor absoluto de la desviación estándar ya que aunque las variaciones de σ son similares en ambos casos, no lo es su valor absoluto, siendo en el caso de las células multicristalinas (grupo δ) mucho mayor. Esto se puede ver reflejado en la desviación estándar relativa (DER); en el grupo δ se tiene una DER de $I_{mp} (\sigma/\overline{I_{mp}})$, de hasta un 3,13% (expresado en tanto por ciento), mientras que en los α y β el coeficiente de variación de I_{mp} es menor a 1,23%. Esto influye en la suposición de que la variación del parámetro I_{mp} es un pequeño porcentaje del valor medio de I_{mp} ($\overline{I_{mp}}$), suposición fundamental que toma Bucciarelli para llegar a la fórmula (3.2).

Para dar un marco cuantitativo a los resultados obtenidos, se han comparado los resultados presentes en esta tesis con los RPL experimentales dados por otros autores. Así Chamberlin *et al*, [68], en su estudio de la asociación en serie de módulos FV, llegaron a un RPL máximo de 0,53% para una DER de 1,3% en I_{mp} . En este caso, aunque la comparación debe ser realizada con ciertas precauciones, ya que las condiciones de irradiancia y temperatura son menos controlables en el exterior, los resultados de RPL son similares a los obtenidos en nuestro estudio. En cuanto a la asociación en serie de células para formar un módulo, otros autores [74] dieron una RPL máxima del 1% cuando se produce una disminución del 8% de la I_{mp} mediante la sombra provocada de una célula dentro del módulo. Estos valores de RPL son también del mismo orden que los obtenidos en nuestro estudio. Sin embargo, es necesario recordar que el RPL investigado en esta tesis es un RPL estadístico que resulta de los promedios de los RPL que se producen dentro de cada módulo.

3.4. CALCULO DEL RPL TEÓRICO Y SU COMPARACIÓN CON EL EXPERIMENTAL

En este apartado se realiza una comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en este estudio con los resultados teóricos obtenidos por Bucciarelli [75] y Kaushika *et al.* [76].

3.4.1. DESARROLLO DEL RPL SEGÚN BUCCIARELLI

El desarrollo del RPL teórico se hará basándose en el trabajo de Louis L. Bucciarelli [75]. Como ya se ha comentado, Bucciarelli parte de la siguiente ecuación para definir el comportamiento de una célula:

$$\frac{I}{I_{mp}} = \alpha - \beta e^{C \left(\frac{V}{V_{mp}} \right)} \quad (3.11)$$

donde C puede ser expresado en términos del *Fill Factor*, FF. Por otra parte, $\overline{I_{mp}}$ y $\overline{V_{mp}}$ son la corriente y el voltaje promedio en el punto de máxima potencia de un grupo de células determinado (en nuestro caso, el “grupo de células” se trata de un conjunto de células asociadas en serie).

Asumiendo que:

$$\left(\frac{d(IV)}{dV} \right)_{V=V_{mp}} = 0, \quad \text{y que por tanto} \quad \left(\frac{dI}{dV} \right)_{V=V_{mp}} = -I_{mp}/V_{mp} ,$$

se llega a las siguientes expresiones de α y β :

$$\alpha = \frac{\left(\frac{I_{mp}}{\overline{I_{mp}}}\right)\left(1 + \frac{C \cdot V_{mp}}{\overline{V_{mp}}}\right)}{\frac{C \cdot V_{mp}}{\overline{V_{mp}}}} \quad (3.12)$$

$$\beta = \frac{\left(\frac{I_{mp}}{\overline{I_{mp}}}\right) \cdot e^{-\left(\frac{C \cdot V_{mp}}{\overline{V_{mp}}}\right)}}{\frac{C \cdot V_{mp}}{\overline{V_{mp}}}} \quad (3.13)$$

Despreciando e^{-C} frente a 1 (los valores que se han obtenido de C en este trabajo van desde 9 hasta 13, con lo que se puede hacer esa aproximación), se llega a una expresión que relaciona el FF y C :

$$FF = \frac{C^2}{(1 + C)[C + \ln(1 + C)]} \quad (3.14)$$

Por otro lado, cuando un grupo de células es asociado en serie, Bucciarelli define la pérdida relativa de potencia, RPL, como:

$$\Delta P = RPL_B = \frac{P_{maxB} - P_{mp}}{\overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} N} \quad (3.15)$$

donde:

$P_{maxB} = \sum_{r=1}^N I_{mp}(r) V_{mp}(r)$, lo que equivale a la suma por separado (sin estar asociadas) de la potencia de cada célula r dentro de la serie.

La diferencia entre P_{maxB} (Bucciarelli) y P_{max} (nomenclatura utilizada en este estudio, ecuación (3.5)) es tan sólo conceptual. Con P_{maxB} , Bucciarelli se refiere a la suma de la potencia máxima individual de las células que se encuentran dentro de un módulo,

mientras que P_{max} , en nuestro estudio, se refiere al promedio de la potencia máxima, P_m , de las células de una determinada agrupación. Es decir:

$P_{max} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T P_{m_i}$, donde T es el número total de células que conforman una determinada agrupación.

$P_{mp} \equiv I_m \cdot V_m \equiv$ Potencia de la serie de células en el punto de máxima potencia. En nuestro estudio esto es simplemente la potencia del módulo

$\overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} \cdot N \equiv$ Potencia promedio de las células que hay en la serie x número de células que hay en la serie (N)

Para expresar el RPL en función de las corrientes y voltajes de cada una de las células, Bucciarelli realiza los siguientes desarrollos para P_{maxB} y P_{mp} :

Desarrollo correspondiente a P_{maxB} .

Para cada célula, Bucciarelli define la corriente normalizada (i_r) y el voltaje normalizado (v_r) de la célula r como:

$$\frac{I_{mp}(r)}{I_{mp}} \equiv i_r \quad (3.16)$$

$$\frac{V_{mp}(r)}{V_{mp}} \equiv v_r \quad (3.17)$$

Otra forma de expresar la corriente y el voltaje normalizado de cada célula es mediante una constante (1 por estar normalizado) más una pequeña perturbación de primer orden.

$$i_r = 1 + \epsilon \eta_r \quad (3.18)$$

$$v_r = 1 + \epsilon \xi_r \quad (3.19)$$

Sustituyendo y utilizando las ecuaciones 17a y 17b de la referencia [75] se obtiene, para N células:

$$\begin{aligned} P_{maxB} &= \sum_{r=1}^N I_{mp}(r) V_{mp}(r) = \\ &= \overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} N \left[1 + \epsilon \left(\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \eta_r + \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \xi_r \right) + \epsilon^2 \left(\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \eta_r \xi_r \right) \right] \end{aligned} \quad (3.20)$$

Desarrollo correspondiente a P_{mp} :

Para la asociación en serie, Bucciarelli define la corriente que pasa por la serie y el voltaje de la misma como:

$$I = \frac{I_m}{\overline{I_{mp}}} \quad (3.21)$$

$$V = \frac{V_m}{\overline{V_{mp}}} \quad (3.22)$$

Se define la corriente y el voltaje normalizado de cada célula dentro de la serie como una constante (1 por estar normalizado) más una pequeña perturbación de segundo orden:

$$I = 1 + \epsilon y_1 + \epsilon^2 y_2 \quad (3.23)$$

$$V = N(1 + \epsilon x_1 + \epsilon^2 x_2) \quad (3.24)$$

$$P_{mp} = I_m V_m = \overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} N(1 + \epsilon y_1 + \epsilon^2 y_2)(1 + \epsilon x_1 + \epsilon^2 x_2) \quad (3.25)$$

Despreciando los términos de orden tres y cuatro:

$$P_{mp} \cong \overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} N(1 + \epsilon(x_1 + y_1) + \epsilon^2(x_2 + y_1x_1 + y_2)) \quad (3.26)$$

Desarrollando, agrupando términos y expresando x_1 , x_2 , y_1 e y_2 en función de ξ_r y η_r se obtiene:

$$P_{mp} = \overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} N \left[1 + \epsilon \left(\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \eta_r + \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \xi_r \right) + \epsilon^2 \left(\frac{C+2}{2} \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \eta_r \right)^2 - \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \eta_r^2 \right] + \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \eta_r \xi_r \right) \right] \quad (3.27)$$

Resta de ambos desarrollos ($P_{maxB} - P_{mp}$).

Al hacer la resta de los dos desarrollos anteriores, la mayor parte de los términos se cancela y sólo queda:

$$P_{maxB} - P_{mp} = \overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} N \epsilon^2 \left(\frac{C+2}{2} \left[\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \eta_r^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \eta_r \right)^2 \right] \right) \quad (3.28)$$

Bucciarelli en su desarrollo asume que I_{mp} y V_{mp} están incorreladas, entonces el valor esperado es:

$$E[\xi_r \eta_s] = 0 \quad (3.29)$$

donde r, s van desde 1 hasta N

$$\sigma_\eta^2 = E[\epsilon^2 \eta^2] \quad (3.30)$$

$$E \left[\left(\frac{\epsilon}{N} \sum_{r=1}^N \eta_r \right)^2 \right] \cong \sigma_\eta^2 / N \quad (3.31)$$

Siendo σ_η^2 la varianza relativa. Así, la diferencia de ambas potencias queda:

$$\begin{aligned} P_{maxB} - P_{mp} &= \overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} N \epsilon^2 \left(\frac{C+2}{2} \left[\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \eta_r^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \eta_r \right)^2 \right] \right) = \\ &= \overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} N \left(\frac{C+2}{2} \left[\sigma_\eta^2 - \frac{\sigma_\eta^2}{N} \right] \right) \end{aligned} \quad (3.32)$$

Finalmente se llega a una expresión sencilla para la pérdida relativa de potencia de células en serie en función de la varianza relativa de la I_{mp} , C y del número de células en serie (N):

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{P_{maxB} - P_{mp}}{\overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} N} = \frac{\overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} N \left(\frac{C+2}{2} \left[\sigma_\eta^2 - \frac{\sigma_\eta^2}{N} \right] \right)}{\overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} N} = \\ &= \frac{C+2}{2} \sigma_\eta^2 \left[1 - \frac{1}{N} \right] \end{aligned} \quad (3.33)$$

Esta es la expresión de pérdida de potencia relativa de N células conectadas en serie con una dispersión en I_{mp} caracterizada por σ_η , que es la desviación típica relativa (o desviación estándar relativa, DER) de la corriente, es decir:

$$\sigma_\eta = \frac{\sigma}{\overline{I_{mp}}}$$

3.4.2. DEFINICIÓN DEL RPL PROMEDIO Y COMPARACIÓN CON BUCCIARELLI

En nuestro caso, aunque se midieron todas las células utilizadas, no es posible conocer exactamente qué células existen dentro de cada módulo, ya que aunque estuvieran identificadas las 72 células que se van a utilizar para cada módulo, siempre ocurren roturas, especialmente en el proceso de soldadura, y por tanto, células que han de ser reemplazadas, por lo que habría que volver a identificar las nuevas células utilizadas. Además, debido a la magnitud del experimento y al entorno de producción en el que se desarrolló el mismo, resultó imposible realizar la identificación de células a esos niveles. En consecuencia, sólo se cuenta con los parámetros eléctricos de la agrupación de células de las que proceden los módulos. Se hará, por tanto, el promedio de RPL (\overline{RPL}) de los módulos de cada agrupación utilizando la fórmula de Bucciarelli.

Dado una agrupación de T células de la que se han fabricado M módulos, se mide la potencia de cada uno de los módulos y se calcula su promedio:

$$\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M P_{mpj} = P_{mod}, \text{ donde } P_{mpj} \text{ es la potencia máxima del módulo } j.$$

Se define la potencia promedio de las células de dicha agrupación como:

$$\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T P_{mi} = P_{max}, \text{ donde } P_{mi} \text{ es la potencia máxima de la célula } i.$$

y el RPL promedio experimental (\overline{RPL}_E) de cada agrupación (ecuación (3.5)):

$$\overline{RPL}_E = \frac{N \cdot P_{max} - P_{mod}}{N \cdot P_{max}} \quad (3.34)$$

Siendo N el número de células en serie dentro de cada módulo.

Utilizando la fórmula de Bucciarelli, se define el RPL del módulo j perteneciente a una agrupación determinada como:

$$RPL_{Bj} = \frac{P_{maxB,j} - P_{mp,j}}{\overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} N} \quad (3.35)$$

Donde, $P_{maxB,j}$, es la suma de la potencia máxima (P_m) de las células dentro del módulo j .

Haciendo el RPL promedio de los M módulos de una determinada agrupación,

$\overline{RPL}_B = \frac{\sum_{j=1}^M RPL_{Bj}}{M}$, y dado que por definición $N \cdot M = T$, se obtiene:

$$\begin{aligned} \overline{RPL}_B &= \frac{P_{maxB_1} + P_{maxB_2} + \dots + P_{maxB_M} - (P_{mp_1} + P_{mp_2} + \dots + P_{mp_M})}{\overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} NM} = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^N P_{m_{i,1}} + \sum_{i=1}^N P_{m_{i,2}} + \dots + \sum_{i=1}^N P_{m_{i,M}} - (P_{mp_1} + P_{mp_2} + \dots + P_{mp_M})}{\overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} NM} \quad (3.36) \\ &= \frac{NP_{max} - P_{mod}}{\overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} N} = \frac{NP_{max} - P_{mod}}{NP_{max}} \end{aligned}$$

Donde P_{max} es, como se ha definido en la ecuación (3.5), el promedio de la potencia máxima individual, P_m , de las células de una determinada agrupación.

Es decir, el promedio de RPL realizado con la fórmula de Bucciarelli sobre M módulos de una agrupación es equivalente al realizado en este estudio:

$$\overline{I_{mp}} \cdot \overline{V_{mp}} = P_{max} \rightarrow \overline{RPL}_B = \overline{RPL}_E \quad (3.37)$$

Por tanto se empleará la ecuación (3.33) de Bucciarelli para hallar el RPL promedio. Este RPL promedio, así obtenido, es también denotado como \overline{RPL}_B . Para ello, se debe

calcular el promedio de los RPL de cada módulo utilizando el último término de la ecuación (3.33).

Los RPL de cada módulo dentro de una misma agrupación de M módulos con N células en serie por módulo son:

$$\begin{aligned}
 RPL_1 &= \frac{C_1 + 2}{2} \sigma_{\eta_1}^2 \left[1 - \frac{1}{N} \right] \\
 RPL_2 &= \frac{C_2 + 2}{2} \sigma_{\eta_2}^2 \left[1 - \frac{1}{N} \right] \\
 &\vdots \\
 RPL_M &= \frac{C_M + 2}{2} \sigma_{\eta_M}^2 \left[1 - \frac{1}{N} \right]
 \end{aligned} \tag{3.38}$$

Y su RPL promedio es:

$$\begin{aligned}
 \overline{RPL} &= \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{C_j + 2}{2} \sigma_{\eta_j}^2 \left[1 - \frac{1}{N} \right] = \left[1 - \frac{1}{N} \right] \frac{1}{2M} \sum_{j=1}^M (C_j + 2) \sigma_{\eta_j}^2 = \\
 &= \left[1 - \frac{1}{N} \right] \frac{1}{2M} \left[\sum_{j=1}^M C_j \sigma_{\eta_j}^2 + 2 \sum_{j=1}^M \sigma_{\eta_j}^2 \right]
 \end{aligned} \tag{3.39}$$

Como se ha comentado anteriormente, no es posible conocer la desviación típica, σ_{η_j} ni el parámetro C_j de cada grupo de células que hay en cada módulo. Por tanto, se utilizará la inferencia estadística para averiguar si los grupos de $N=72$ células que forman cada módulo (muestra) son suficientemente representativos de la agrupación (población).

El modo de selección de las células para formar módulos ha sido completamente aleatorio, con lo que, en principio, se asume que I_{mp} es una variable aleatoria que sigue una distribución normal $\mathbf{N}(\mu, \sigma)$. Dentro de cada agrupación, en este caso población, se toman muestras de 72 células (módulo) cuya media muestral también sigue una distribución normal $\mathbf{N}(\mu, \frac{\sigma}{\sqrt{N}})$.

En este planteamiento, definiremos la media de la corriente en el punto de máxima potencia de las células (medidas por separado) que hay dentro de un módulo con el símbolo $\overline{I_M}$. Se ha designado el subíndice M en mayúscula para evitar confusiones con la I_m , que se refiere a la corriente en el punto de máxima potencia de una serie de células ya asociadas (en nuestro caso la corriente del módulo).

$$\left. \begin{array}{l} \overline{I_M} \equiv \text{Media muestral de cada módulo} \\ \overline{I_{mp}} \equiv \text{Media de la población (agrupación)} \end{array} \right\} \boxed{\overline{I_M} = \overline{I_{mp}}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma \equiv \text{Desviación típica de la corriente} \\ \text{de la población (agrupación)} \\ \sigma_{\eta_j} \equiv \text{Desviación típica de la corriente} \\ \text{normalizada de la muestra (módulo)} \forall j \end{array} \right\} \boxed{\sigma_{\eta_j} = \frac{\sigma}{\overline{I_{mp}}\sqrt{N}}}$$

Según la inferencia estadística, si se pretende estimar la media de una población normal mediante el estudio de una muestra de tamaño N , se impone que el error que se comete al estimar la media muestral como la media de la población, sea inferior a un determinado valor β , es decir:

$$|\overline{I_M} - \overline{I_{mp}}| \leq \beta \quad (3.40)$$

$$\overline{I_M} - \beta \leq \overline{I_{mp}} \leq \overline{I_M} + \beta \quad (3.41)$$

La probabilidad de que el intervalo elegido en (3.41) contenga, con un nivel de confianza $1-\alpha$, al verdadero valor de $\overline{I_{mp}}$ será:

$$P\left(\overline{I}_M - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \leq \overline{I}_{mp} \leq \overline{I}_M + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}\right) = 1 - \alpha \quad (3.42)$$

Siendo Z la resultante del cambio de variable para obtener una distribución normal $N(0,1)$ ya tabulada. Por tanto:

$$\beta = Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (3.43)$$

Despejando N se obtiene:

$$N = \frac{Z_{\alpha/2}^2 * \sigma^2}{\beta^2} \quad (3.44)$$

Lo que significa que, de las veces que se repite el experimento (en este caso de los M módulos fabricados), un $(1-\alpha)$ % de las veces, la media muestral diferirá de la media poblacional en menos de β . Trasladando esto a los resultados obtenidos en cada agrupación y teniendo en cuenta que N y σ son conocidas e invariables, se calculan α y β mínimos (ver *Tabla 3-13* y *Tabla 3-14*). Para el caso de N , se impone que nunca sea mayor que 72, que es el número de células que hay en cada módulo.

	β [%]	$(1-\alpha)$ [%]	$Z_{(\alpha/2)}$	N
$\alpha 1775A$	1,21	99	2,575	71
$\alpha 1775B$	1,15	99	2,575	70
$\alpha 1775C$	0,86	99	2,575	71
$\alpha 1775X$	1,55	97	2,17	72

	β [%]	$(1-\alpha)$ [%]	$Z_{(\alpha/2)}$	N
$\beta 1775A$	0,58	99	2,575	72
$\beta 1775B$	0,91	99	2,575	72
$\beta 1775C$	0,39	99	2,575	70
$\beta 1775X$	1,65	97	2,17	72

Tabla 3-13. Nivel de confianza $(1-\alpha)$ y error β de los subgrupos $\alpha 1775$ y $\beta 1775$. La N ha sido elegida de tal manera que sea próxima a 72 pero siempre inferior a 73.

	β [%]	$(1-\alpha)$ [%]	$Z_{(\alpha/2)}$	N
$\delta 1457A$	2,75	95	1,645	71
$\delta 1457B$	2,16	95	1,645	72
$\delta 1457C$	1,87	95	1,645	71

	β [%]	$(1-\alpha)$ [%]	$Z_{(\alpha/2)}$	N
$\delta 1423A$	2,3	95	1,645	70
$\delta 1423B$	2,06	95	1,645	72
$\delta 1423C$	1,8	95	1,645	72

Tabla 3-14. Nivel de confianza $(1-\alpha)$ y error β de los subgrupos $\delta 1457$ y $\delta 1423$. La N ha sido elegida de tal manera que sea próxima a 72 pero siempre inferior a 73.

Es decir, para cada agrupación, se supondrá la media de cada módulo (muestra) como la media de la agrupación (población) $\overline{I_M} = \overline{I_{mp}}$, con un nivel de confianza $(1-\alpha)$ y una diferencia (β) especificadas en la *Tabla 3-13* y *Tabla 3-14*. A su vez la desviación típica de cada módulo será la de la población, σ , dividida entre \sqrt{N} , esto es.

$$\overline{I_M} = \overline{I_{mp}} \quad (3.45)$$

$$\sigma_{\eta_j} = \frac{\sigma}{\overline{I_{mp}}\sqrt{N}} \quad (3.46)$$

En el denominador de la ecuación (3.46) aparece el promedio de la corriente máxima ya que la desviación típica, en la expresión de Bucciarelli, está referida a la corriente media ($\overline{I_{mp}}$).

De esta manera la ecuación (3.39) queda:

$$\begin{aligned} \overline{RPL} &= \left[1 - \frac{1}{N}\right] \frac{1}{2M} \left[\sum_{j=1}^M C_j \sigma_{\eta_j}^2 + 2 \sum_{j=1}^M \sigma_{\eta_j}^2 \right] = \\ &= \left[1 - \frac{1}{N}\right] \frac{1}{2M} \left[\frac{\sigma^2}{\overline{I_{mp}}^2 N} \sum_{j=1}^M C_j + 2 \cdot \frac{M \sigma^2}{\overline{I_{mp}}^2 N} \right] \end{aligned} \quad (3.47)$$

En la ecuación (3.33), propuesta por Bucciarelli, se supone C constante para cada módulo. Sin embargo, en este estudio se puede ser más preciso y considerar C un parámetro distinto para cada célula. Así la C_j del módulo j se obtiene como el

promedio de los parámetros C_i ($i = 1, \dots, N$) de todas las células que hay dentro del módulo j :

$$C_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{ij} \quad (3.48)$$

El promedio total de C de todos los módulos de la agrupación será:

$$\bar{C} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M C_j = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N C_{ij} \quad (3.49)$$

Quedando el promedio del RPL de cada agrupación:

$$\begin{aligned} \overline{RPL} &= \left[1 - \frac{1}{N}\right] \frac{1}{2M} \left[\frac{\sigma^2}{\overline{I_{mp}}^2 N} \sum_{j=1}^M C_j + 2 \cdot \frac{M\sigma^2}{\overline{I_{mp}}^2 N} \right] = \\ &= \left[1 - \frac{1}{N}\right] \frac{\sigma^2}{2MN\overline{I_{mp}}^2} \left[2M + \sum_{j=1}^M C_j \right] = \\ &= \left[1 - \frac{1}{N}\right] \frac{\sigma^2}{2MN\overline{I_{mp}}^2} [2M + \bar{C}M] = \\ &= \left[1 - \frac{1}{N}\right] \frac{\sigma^2}{N\overline{I_{mp}}^2} \left[1 + \frac{\bar{C}}{2}\right] \end{aligned} \quad (3.50)$$

Lo que al final resulta:

$$\overline{RPL}_B = \frac{\bar{C} + 2}{2} \cdot \frac{\sigma^2}{N\overline{I_{mp}}^2} \cdot \left[1 - \frac{1}{N}\right] \quad (3.51)$$

El subíndice B ha sido utilizado para diferenciar este RPL con el obtenido experimentalmente en este trabajo.

Expresando la ecuación (3.51) en tanto por ciento:

$$\overline{RPL}_B\% = \frac{\bar{C} + 2}{2} \cdot \frac{\sigma^2}{N\bar{I}_{mp}^2} \cdot \left[1 - \frac{1}{N}\right] \times 100 \quad (3.52)$$

Finalmente se ha obtenido que el promedio del RPL de una agrupación de módulos será el mismo que el RPL de un módulo representativo de dicha agrupación con una desviación típica igual a la de la agrupación dividida entre \sqrt{N} y relativa al promedio de I_{mp} (\bar{I}_{mp}).

Dado que se ha determinado el dato del *Fill Factor* de cada célula se puede obtener el parámetro C para todas ellas utilizando la ecuación trascendente (3.53):

$$FF = \frac{C^2}{(1 + C)(C + \ln(1 + C))} \quad (3.53)$$

Esta ecuación se ha resuelto por métodos numéricos, partiendo del FF medido en el “cell tester”, obteniendo así el valor de C para cada célula. El promedio de C , (\bar{C}), para cada agrupación, es el valor introducido en la ecuación (3.51) para determinar el \overline{RPL}_B .

3.4.3. RESULTADOS DE LOS GRUPOS α Y β

En las siguientes tablas se comparan los RPLs promedio obtenidos por la aproximación de Bucciarelli (ecuación (3.52), columna 2) y los obtenidos experimentalmente en este estudio (ecuación (3.34), columna 3). También se han incluido la varianza de I_{mp} (σ^2) y el promedio de C para cada agrupación (C ha sido calculado mediante la resolución por métodos numéricos de la ecuación (3.53)). El factor de idealidad del diodo (A) ha sido calculado mediante la ecuación (3.4) y después promediado para cada agrupación.

Agrupación	$\overline{RPL}_B\%$	$\overline{RPL}_E\%$	Varianza de I_{mp}	\bar{C}	Factor de idealidad \bar{A} (C)
$\alpha 1775A$	0,0006	2,33	0,0016	12,87	1,57
$\alpha 1775B$	0,0006	2,45	0,0014	14,17	1,44
$\alpha 1775C$	0,0003	2,33	0,0008	15,21	1,35
$\alpha 1775X$	0,0014	2,41	0,0037	13,74	1,48
$\beta 1775A$	0,0001	1,88	0,0004	13,56	1,48
$\beta 1775B$	0,0003	1,16	0,0009	13,96	1,46
$\beta 1775C$	0,00004	1,39	0,0001	14,21	1,45
$\beta 1775X$	0,0016	1,79	0,0041	13,69	1,48

Tabla 3-15. Comparación entre $\overline{RPL}_B\%$ y $\overline{RPL}_E\%$ para los subgrupos $\alpha 1775$ y $\beta 1775$

A la hora de comparar ambos RPL ($\overline{RPL}_B\%$ y $\overline{RPL}_E\%$), es necesario tener en cuenta que el RPL teórico no contempla las “pérdidas de potencia por encapsulado” o “Cell-to-Module (CTM) losses”, llamadas así a todas las pérdidas debidas a la conexión de las células entre sí (aumento de la resistencia serie y pérdida por sombreado de la cinta de conexión) [84], [85], [86], [87], [88] y a la pérdida por absorción y reflexión provocada por materiales tales como el EVA y el vidrio [89], [90] . Estas “pérdidas por encapsulado” (PPE) sí están presentes, sin embargo, en el RPL experimental ($\overline{RPL}_E\%$).

Además, las PPE son diferentes entre los distintos tipos de células. Por un lado, y como ya se ha comentado en la sección 3.3.3.2, página 106, los módulos del grupo δ (con células multicristalinas) poseen el mismo tipo y sección de cinta de conexión que los módulos fabricados con células de los grupos α y β , las cuales poseen mayor eficiencia, potencia y corriente. Esto supone una pérdida de potencia mayor para módulos fabricados con dichas células. Existen otros efectos que contribuyen al RPL, como es la radiación reflejada por el *backsheet*, que en un determinado porcentaje vuelve a ser reflejada por el vidrio y enviada a las células. Esta radiación extra provoca una ganancia de potencia del módulo en comparación con la célula aislada. Dicha ganancia es directamente proporcional al área de lámina posterior o "*backsheet*" expuesta.

Teniendo en cuenta las PPE, se puede explicar la escasa diferencia observada en los grupos α y β , en los cuales el RPL teórico es prácticamente despreciable. Incluso para la agrupación X, que aunque se observa que presenta un RPL mayor que las A, B y C, este sigue siendo muy bajo para los niveles de detección de los equipos de medida. Así, entendiendo las PPE como iguales entre las distintas agrupaciones, el RPL experimental de la agrupación X no resulta mayor que el de las otras agrupaciones. Por tanto se puede concluir que los valores de dispersión obtenidos en α y β no son suficientemente altos como para llegar a valores de RPL detectables.

3.4.4. RESULTADOS DEL GRUPO δ

En el caso del grupo formado por células multicristalinas de menor eficiencia resulta:

Agrupación	$\overline{RPL}_B\%$	$\overline{RPL}_E\%$	Varianza de I_{mp}	\bar{C}	Factor de idealidad $\bar{A} (C)$
$\delta 1457A$	0,009	1,93	0,0199	11,66	1,71
$\delta 1457B$	0,006	0,75	0,0123	11,95	1,67
$\delta 1457C$	0,005	0,09	0,0092	12,21	1,64
$\delta 1423A$	0,007	1,96	0,0137	11,48	1,72
$\delta 1423B$	0,006	0,89	0,0112	11,80	1,68
$\delta 1423C$	0,004	0,13	0,0086	12,17	1,63

Tabla 3-16. Comparación entre $\overline{RPL}_B\%$ y $\overline{RPL}_E\%$ para los subgrupos $\delta 1457$ y $\delta 1423$

En este caso, como ya se observó anteriormente, se ha conseguido aumentar sensiblemente la dispersión de los parámetros eléctricos de las células. Se observa en general un $\overline{RPL}_E\%$ menor al de los grupos α y β . Esto es debido al error sistemático de calibración y a la resistencia serie de la cinta de conexión. En el caso de los módulos δ , la potencia que tiene que ser extraída por la cinta (159W-165W) es mucho menor que en el caso de los módulos α y β , donde la misma sección y longitud de cinta debe extraer una potencia de 192 W aproximadamente, perdiéndose más potencia por efecto Joule y aumentando el RPL. Por otro lado, debido a que las células monocristalinas dejan más área expuesta de lámina posterior, el efecto de la radiación reflejada por la lámina posterior disminuye las PPE de los módulos monocristalinos (grupos α y β) en comparación con los multicristalinos (grupo δ), lo que contribuye a un mayor $\overline{RPL}_E\%$ para el grupo δ . Como se puede ver en la Tabla 3-15 y la Tabla 3-16, aún con la influencia de la radiación reflejada, el $\overline{RPL}_E\%$ de los grupos α y β es mayor que el del grupo δ . Considerando que la absorción de radiación debida al vidrio y al encapsulante y que las pérdidas por sombras debidas a la cinta de conexión son

idénticas para los dos tipos de módulos, el efecto del aumento de la resistencia serie debido a la cinta de conexión o “tab” posee la mayor influencia en la pérdida de potencia de célula a módulo o PPE [84] [91].

No obstante, en la sección 3.3.3.2 (grupo δ), sí existe una tendencia clara de aumento de RPL experimental. Si se compara el $\overline{RPL}_E\%$ con el $\overline{RPL}_B\%$, se comprueba que los cambios de RPL de una agrupación a otra no mantienen la misma proporcionalidad, tal y como se muestra en la *Figura 3-24*.

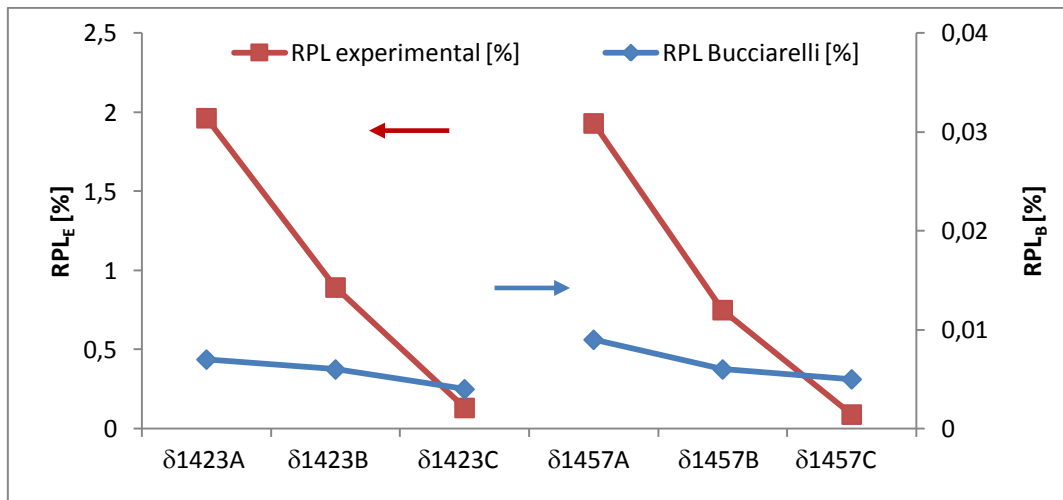


Figura 3-24. Comparación de RPL según el desarrollo de Bucciarelli ($\overline{RPL}_B\%$) y el RPL experimental ($\overline{RPL}_E\%$)

El $\overline{RPL}_B\%$ basado en la fórmula de Bucciarelli, toma valores hasta 200 veces mayores en δ que en α y β , sin embargo siguen siendo porcentajes muy bajos comparados con los obtenidos de forma experimental. Es necesario comentar que la fórmula (3.51) de Bucciarelli se basa en el supuesto de que las distribuciones en I_{mp} (en el caso de este estudio) son distribuciones gaussianas. Sin embargo, resultados preliminares siguiendo el método de Kolmogorov-Smirnov [92] de prueba de normalidad, indican que las distribuciones analizadas no se ajustan a una distribución gaussiana ideal. Para las muestras con las que se ha trabajado en este estudio, las distribuciones en I_{mp} forman dos picos en torno al promedio. Esto ocurre tanto en el subgrupo como en las

agrupaciones derivadas del mismo. Como las distribuciones no son gaussianas, la desviación estándar de I_{mp} es mayor que la contemplada por Bucciarelli. Por otro lado, la variación de I_{mp} con respecto a su promedio, en algunas agrupaciones, llega hasta el 3%, con lo que los términos cuadráticos del desarrollo de Bucciarelli podrían no ser despreciados. Otro motivo de diferencia entre Bucciarelli y el presente trabajo es la asunción de que I_{mp} y V_{mp} son incorreladas. Esto puede ser cierto bajo una aproximación teórica en la que las células son tomadas aleatoriamente de una población con potencia normalmente distribuida. Sin embargo en la práctica esto no ocurre así. Todos los fabricantes toman células para formar módulos que proceden de una población de células con una potencia determinada y de un fabricante determinado (generalmente no se mezclan fabricantes ni potencias). Esto quiere decir que células que han seguido un mismo proceso de fabricación y que resultan en una potencia determinada, tienen que presentar parámetros de I_{mp} y V_{mp} correlados, es más, con una dependencia inversamente proporcional. Esto, también ha sido observado en nuestras muestras.

Como se ha visto anteriormente se puede, mediante la resolución por métodos numéricos de la ecuación trascendente (3.53), conocer el parámetro de calidad de las células (C) y una vez obtenido C se calcula el factor de idealidad del diodo (A) por medio de la ecuación (3.4). Aunque en el apartado anterior está expresado su promedio para cada agrupación, se representa en este apartado (Figura 3-25) su valor para cada una de las células de las agrupaciones:

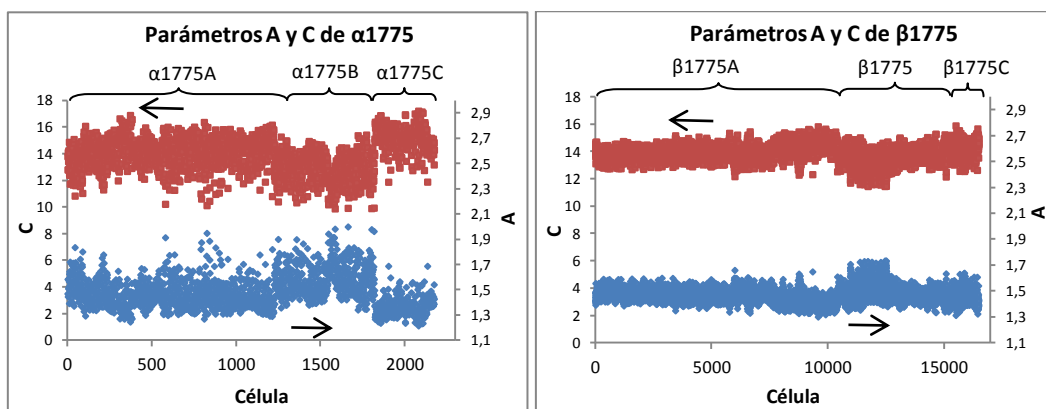


Figura 3-25. Representación del factor de idealidad del diodo (A) y del parámetro C para los subgrupos $\alpha 1775$ y $\beta 1775$

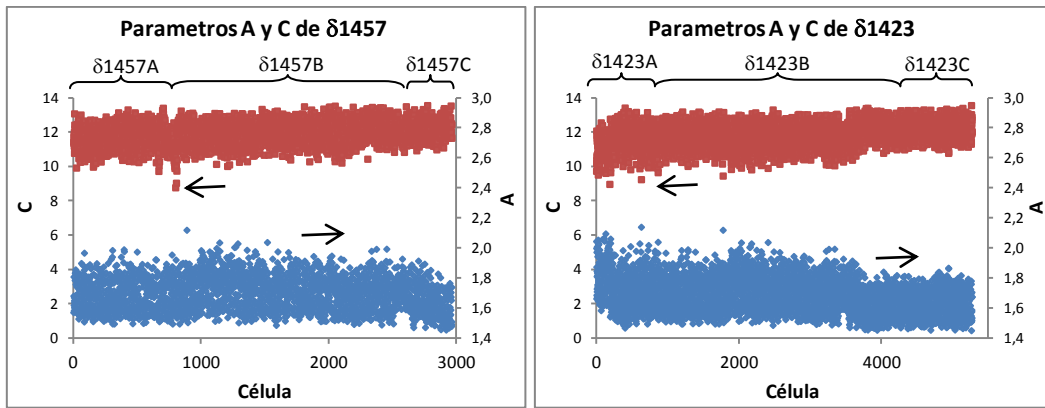


Figura 3-26. Representación del factor de idealidad del diodo (A) y del parámetro C para los subgrupos $\delta 1457$ y $\delta 1423$

Las gráficas de la Figura 3-26 dan una idea de cómo varían ambos factores entre sí para cada una de las agrupaciones. Se puede ver que el factor de calidad de célula C, como es lógico, disminuye para células de menor eficiencia, a las que se les supone, por tanto, una menor calidad.

Capítulo 4

4. ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA TEXTURA SUFERFICIAL DE CÉLULAS MONOCRISTALINAS Y SU CARACTERIZACIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

El texturizado de las células solares de silicio cristalino es un paso crítico para la mejora de su eficiencia [93] [94] [95] [96] [97] [98]. El motivo de generar una textura sobre la superficie de la oblea es el de provocar que la luz incidente sobre la misma experimente múltiples reflexiones y, en consecuencia, aumente la probabilidad de ser absorbida. Es decir, con la textura superficial se aumenta la absorción de la oblea y, a la postre, de la célula. Las células solares más frecuentemente utilizadas se fabrican sobre una oblea de silicio cristalino que puede ser monocristalina o multicristalina. El método más común de texturado es el ataque químico, si bien el tipo de textura resultante depende de que la oblea de silicio sea monocristalina o multicristalina [99]. Las primeras, provienen de un lingote de silicio monocristalino que ha sido crecido, generalmente, por el método Czochralski y en el que todo el volumen del lingote está formado por átomos de silicio dispuestos en una estructura tipo diamante y con la misma orientación.

En las células multicristalinas, en cambio, la oblea de silicio proviene de un lingote multicristalino que ha sido crecido por el Método de Solidificación Direccional. Este tipo de tecnología permite la utilización de un silicio menos puro y se caracteriza por la formación de lingotes, compuestos por granos de silicio con la misma estructura cristalina (estructura tipo diamante, ver figura *Figura 4-1*), pero con distintas

orientaciones. El tamaño de dichos granos varía desde los pocos milímetros hasta unos pocos centímetros. Según sea el tipo de silicio de la oblea (monocristalino o multicristalino), el resultado del texturizado también es diferente.

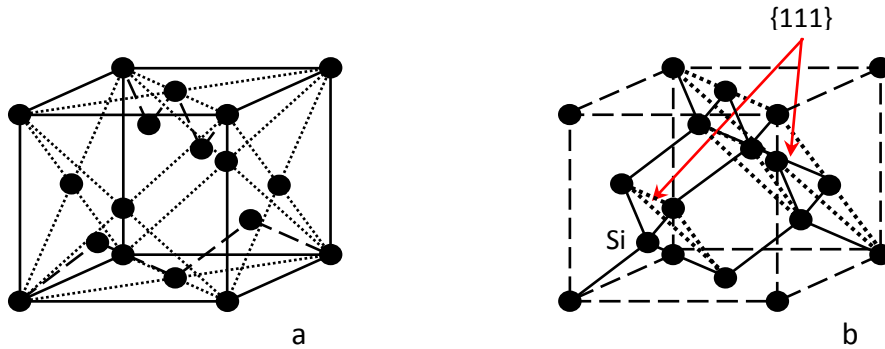


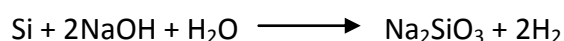
Figura 4-1. (a): Representación esquemática de la red de silicio (red cúbica centrada en las caras, FCC, modificada para formar la estructura tipo diamante). (b): Representación en la que se destacan los enlaces entre los átomos vecinos de Si en los planos {111} (líneas punteadas).

4.1.1. TEXTURIZADO DE SILICIO MONOCRISTALINO.

En este proceso, las obleas de silicio monocristalino son sumergidas en baños cáusticos [100] [101]. Al igual que en el caso multicristalino, existen distintas formulaciones químicas para la composición de dichos baños, unas basadas en el sodio (Na), como pueden ser NaOH [97] [101] [102], $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ [103] [104] ó Na_2CO_3 [105] y otras basadas en el potasio (K), como KOH [102] [106] [107]. La velocidad de ataque de los baños depende de su composición, concentración y temperatura, así como de las propiedades de la superficie del silicio a atacar.

En este estudio nos centraremos en baños de NaOH (sosa), por ser el más ampliamente utilizado por la industria actualmente. En estos tipos de baño se emplea una disolución al 2% de NaOH, alcohol isopropílico (aproximadamente al 6%) y agua desionizada en un baño a una temperatura de 85°C - 87°C.

Una de las reacciones químicas que se producen en el baño con sosa es:



Esta reacción produce hidrógeno gas, dando lugar al burbujeo característico que se observa en los baños de sosa.

La explicación teórica del proceso, más comúnmente aceptada, se basa en que el plano (111) del silicio monocristalino posee una densidad atómica mayor que el (100), por tanto, la sosa atacará mucho más rápidamente los planos (100) que los (111), es decir, se produce un ataque anisótropo [108]. Esto da lugar a un ataque preferencial que hace que prevalezcan los planos (111), lo que a la postre propiciará la formación de unas estructuras características en forma de pirámides con base cuadrada, que cubren toda la superficie atacada, como se describe gráficamente en la *Figura 4-2*. De hecho, de acuerdo con la literatura [109], la adición del isopropanol a la disolución de NaOH en agua hace que el ataque sea más preferencial, de manera que el plano (100) se vea mucho más atacado que el (111). Sin embargo, otros autores han identificado esas formaciones con la superposición de una diversidad de superficies inclinadas [110], siendo las pirámides con base cuadrada un caso particular de pirámides con base octogonal.

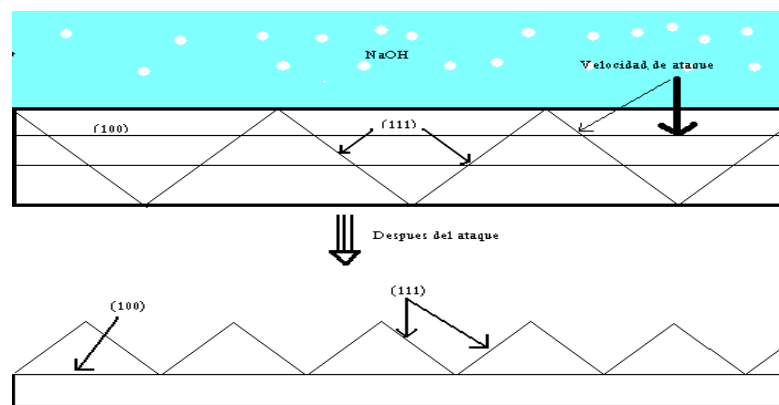


Figura 4-2. Esquema de formación de las pirámides durante el ataque anisótropo de una célula monocristalina

Para entender el proceso sobre la base de la cristalografía del silicio, en la *Figura 4-3* se representan los principales planos cristalinos del silicio. En las obleas utilizadas de silicio monocristalino, el Si es crecido en la dirección [100] formando un lingote, por lo que el plano de las obleas coincide con el (100).

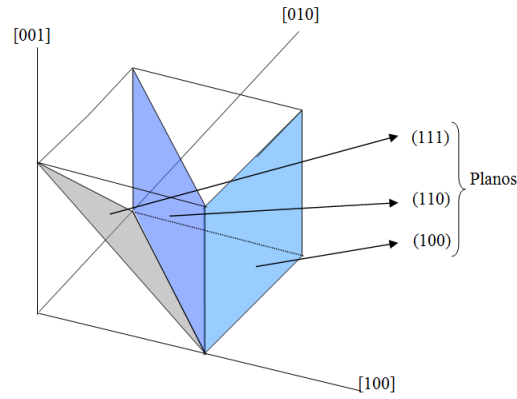


Figura 4-3. Plano y direcciones del silicio monocristalino crecido en la dirección [001]

Conviene recordar que el plano de fractura preferente del silicio en obleas $\langle 100 \rangle$ es el (111). Este plano se hace bastante evidente cuando se fractura una oblea. Las obleas monocristalinas tienden a fracturarse a lo largo de estos planos (111), como se muestra esquemáticamente en la *Figura 4-4*:

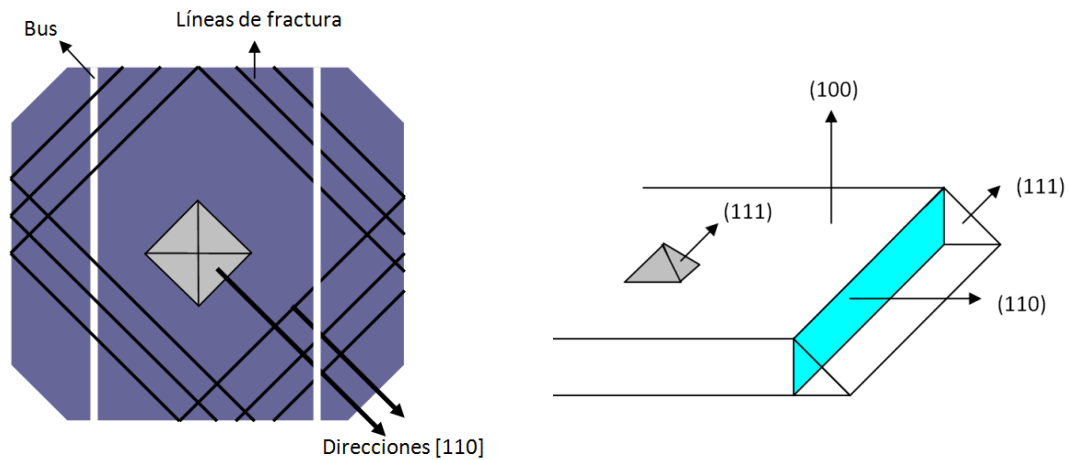


Figura 4-4. Esquema de orientación de las pirámides formadas durante el ataque húmedo sobre el plano (100) del silicio, y líneas de fractura de una célula monocristalina

En la *Figura 4-4* derecha se representa el plano (111) de fractura, mientras que en la imagen izquierda se pueden ver las líneas de fractura de la oblea (líneas más gruesas y negras), es decir, las líneas donde se produce la exfoliación de los planos (111). Según se representa en la misma figura, las bases cuadradas de las pirámides se orientan paralelamente a las direcciones $\langle 110 \rangle$.

4.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL GRADO DE TEXTURA DE LAS OBLEAS DE SILICIO MONOCRISTALINO.

Dada la importancia del proceso de texturizado en las fábricas de células solares, son también muy importantes los sistemas de caracterización del grado de textura como herramienta de control del proceso de ataque químico.

Los métodos que pueden ser utilizados para caracterizar la textura de la superficie de las obleas se basan fundamentalmente en medidas de la calidad superficial a través de métodos ópticos y de microscopía. Por ejemplo, la medida de la rugosidad mediante técnicas de perfilometría [111], el uso de microscopios de fuerza atómica (AFM) [97], o por microscopía electrónica de barrido (SEM) [112]. La aplicación de cualquiera de los métodos mencionados en ambientes de producción presenta diferentes dificultades: los perfilómetros por medio de punta operan en modo contacto y pueden dañar la superficie mientras que los basados en sistemas ópticos no están apropiadamente adaptados a superficies faceteadas debido a las alteraciones que provocan las reflexiones en la superficie. En ambos casos, aunque es posible la realización de un escaneo de la superficie, este es excesivamente lento. El AFM posee una superficie de escaneo extremadamente pequeña y aunque el SEM permite examinar áreas mayores, necesita un ambiente de vacío para la toma de imágenes. Sin embargo la principal limitación de éstas técnicas es el tiempo que requieren para hacer la caracterización completa o mapeo de la superficie de la oblea, siendo, por tanto, muy limitada su aplicación en procesos de producción. Por otro lado, tanto el AFM como el SEM son técnicas invasivas que conllevan la destrucción de la oblea o célula.

Entre las técnicas de caracterización ópticas ya existentes, es ampliamente utilizada la técnica de caracterización espectroscópica mediante la utilización de una esfera integradora acoplada a un espectrofotómetro para medir la reflexión total de la luz incidente en la oblea o célula. Este sistema mide la reflexión total de la célula u oblea en función de la longitud de onda, no obstante, el análisis de la superficie es parcial (se analiza una superficie del tamaño de la apertura del espectrofotómetro) y requiere tiempos prolongados de medida, por lo que no es aplicable a la caracterización masiva de las células durante su fabricación.

Siguiendo esta filosofía, algunos trabajos de la literatura, como los desarrollados por Parretta *et al.* [113] [114], se han interesado por la reflectividad óptica de las células fotovoltaicas texturizadas. En estos trabajos, se realizan medidas bien sea de la reflectancia total o difusa integrada, o bien de la reflectancia especular. Ignorando algunos efectos que se han observado en texturas periódicas y que están asociados a la interferencia de haces múltiples debido a la coherencia del láser de HeNe, los patrones de intensidad óptica que se analizan en estos trabajos poseen simetría circular alrededor del eje de medida, por tanto no son capaces de diferenciar la textura de pirámides que nos ocupa.

Los estudios desarrollados por Sopori *et al.* [115] [116] [117], se han basado en patrones de difracción de la luz en reflexión por una superficie sobre la que se hace incidir un haz láser. Esta técnica ha sido ya explotada comercialmente con un instrumento denominado PVSCAN [118], el cuál es capaz de realizar un mapeo de las contribuciones, por separado, de dislocaciones y fronteras de grano y también provee de una medida de la reflectancia total de la superficie analizada por medio de una esfera integradora. Sin embargo este método recoge influencias de otros factores, como pueden ser manchas debidas a un mal secado, que contribuyen a alterar la reflectancia, con lo que la influencia aislada de la textura se ve “camuflada”.

Otro equipo comercial, el PV-Reflectometer [119], provee de una medida de la rugosidad y reflectancia de las distintas capas (metalización y antirreflectantes) de la célula. Sin embargo, este último utiliza estándares de reflectancia y sufre de algunas derivas en su eficiencia de respuesta [120].

A pesar de las diversas técnicas ya existentes que se basan en la reflectancia óptica para caracterizar las células solares, ninguno de estos métodos han sido desarrollados para la caracterización cuantitativa del grado de textura de la oblea. Este será el objetivo del método presentado en la sección 4.4 de esta tesis.

4.2. OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO

En este capítulo se estudiará el proceso de texturizado de obleas monocristalinas para la producción de células solares con el fin de caracterizar dicho proceso. Esto permitirá optimizar parámetros de proceso y materiales con el objeto de ahorrar costes, tiempo y dinero y conseguir así un proceso más eficiente. Para ello se estudiará el proceso utilizado en la industria y se replicará en el laboratorio. El objetivo de replicar el proceso en el laboratorio será poder variar distintos parámetros, tales como tiempo de ataque y calidad de oblea, para estudiar su influencia en el grado de textura de las obleas.

Por otro lado, se propondrá un método novedoso para caracterizar la eficacia del proceso de texturizado. Este se basa en el análisis de los patrones de luz reflejada por las obleas o células texturizadas [121] [122]. Se trata de un método de no-contacto que permite realizar un análisis cuantitativo en 2-D de la textura de la superficie de la oblea, dando lugar a un mapa de calidad de la textura superficial de la oblea. Además, este método no requiere de la utilización de patrones de reflectancia para su calibración. La simplicidad de este método permite su implementación en líneas de producción de células solares para rechazar o reprocesar obleas con un grado de texturizado por debajo de las especificaciones establecidas. También permite controlar las variaciones de los baños de texturizado, con lo que se puede reaccionar antes de que lleguen a su tiempo de vida límite evitando así el mal procesado de grandes cantidades de obleas, o bien alargar la vida de dichos baños en caso de que el número de ciclos establecido para su cambio esté por debajo de su vida útil.

4.3. TEXTURIZADO EXPERIMENTAL DE OBLEAS MONOCRISTALINAS

4.3.1. TEXTURIZADO EN PROCESOS INDUSTRIALES

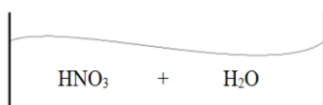
En este estudio se emplearon obleas monocristalinas de 125x125mm de lado y 150mm de diámetro y con resistividad de $1 \Omega \cdot \text{cm}$ procedentes de un lingote crecido por el método Czochralski en la dirección [100]. Se utilizaron muestras de dos suministradores distintos aunque con las mismas especificaciones técnicas.

Para la obtención de muestras texturizadas en procesos industriales, se solicitaron muestras a BP Solar España procedentes de su anterior planta de fabricación de células FV de Tres Cantos. El proceso de texturizado consta de un proceso previo de limpieza con ácido nítrico a temperatura ambiente y diversos aclarados en agua desionizada con burbujeo de aire. Para controlar la calidad del agua desionizada, la cual es recirculada en un circuito cerrado, se mide su conductancia. Posteriormente a la limpieza con ácido se procede a sumergir las obleas en los baños de texturizado con NaOH (en una proporción de 2% en peso) y alcohol isopropílico (en una proporción de un 6%). En los baños se introduce un burbujeo de N_2 (distinto de las burbujas de H_2 ya mencionadas, que son producto de la reacción descrita en la sección 4.1.2.) para ayudar a la homogeneización del mismo. La temperatura de proceso es de $(86,0 \pm 1,5) ^\circ\text{C}$. Después, se produce una limpieza con ácido fluorhídrico y varios aclarados con agua desionizada. El proceso está esquematizado en la *Figura 4-5*.

Debido a que dichas muestras fueron obtenidas directamente del proceso de fabricación, no se pudo alterar ninguno de los parámetros que rigen la receta de los baños químicos, por lo que la única variable que se pudo alterar es el tiempo de proceso. De esta manera, durante el proceso de texturizado de obleas estándar, se extrajeron distintas muestras de los baños de texturizado a diferentes tiempos hasta los 25 minutos, que es el tiempo final del proceso industrial.

LIMPIEZA

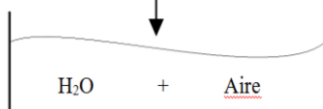
Reactivos:	65% HNO ₃	H ₂ O desionizada (resistividad > 18·10 ⁶ Ω·cm)
------------	----------------------	---



- HNO₃ (4%) + H₂O
- 10 minutos



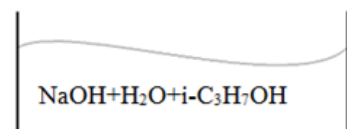
- H₂O
- 10 minutos
- Burbujeo con aire



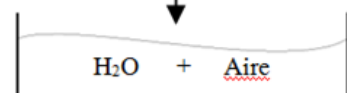
- H₂O
- 10 minutos
- Burbujeo con aire
- Medida de conductividad

TEXTURIZADO

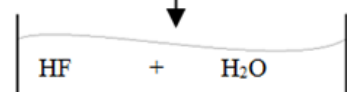
Reactivos:	$\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ \text{Alcohol isopropílico} \Rightarrow \text{CH}_3\text{-CH-CH}_3 \Rightarrow \text{i-C}_3\text{H}_7\text{OH} \end{array}$	97,5% NaOH	40% HF
------------	---	------------	--------



- NaOH (2%) + H₂O + i-C₃H₇OH
- 25-30 minutos
- Burbujeo con N₂
- 85 °C -87 °C



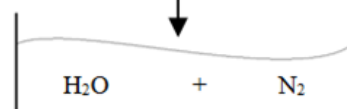
- H₂O
- 5 minutos
- Burbujeo con aire



- HF (2,3%) + H₂O
- 5 minutos



- H₂O
- 5 minutos
- Burbujeo con aire



- H₂O
- 10 minutos
- Burbujeo con N₂

Figura 4-5. Esquema del proceso industrial de LIMPIEZA (arriba) y TEXTURIZADO (abajo). Las proporciones así como los parámetros más importantes del proceso se encuentran definidos a la derecha.

Por otro lado, para cuantificar la influencia del texturizado, se tomaron como referencia otras obleas procedentes del mismo suministrador, sin ser pasadas por ningún tipo de proceso. La superficie de éstas se encuentra sin texturizar y en el microscopio electrónico de barrido (SEM), tienen un aspecto rugoso que le confiere a la oblea una tonalidad gris mate (ver *Figura 4-6*).

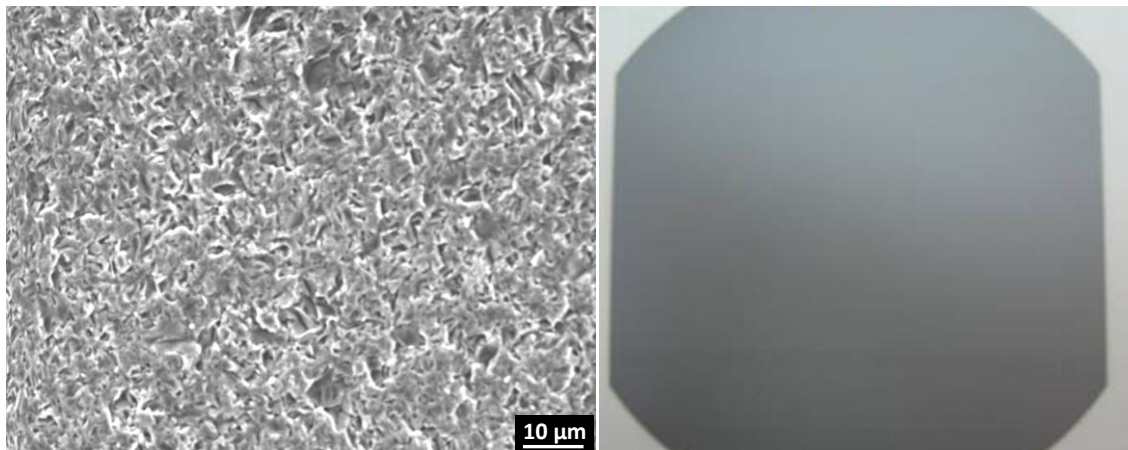


Figura 4-6. Izquierda: Imagen de SEM de la superficie de la oblea monocristalina antes de ser limpiada y texturizada. Derecha: fotografía del aspecto de la oblea.

Una vez texturizadas, las muestras se analizaron en el SEM para determinar su textura. En la *Figura 4-7* se pueden ver las fotografías de SEM de la superficie de cada una de las muestras tomadas a distintos tiempos de texturizado.

Las imágenes muestran cómo a los 5 minutos de proceso, las pirámides comienzan a formarse hasta que, a los 20 minutos aproximadamente, estas coalescen, cubriendo completamente la superficie de la oblea. De 20 a 25 minutos las pirámides aumentan su tamaño.

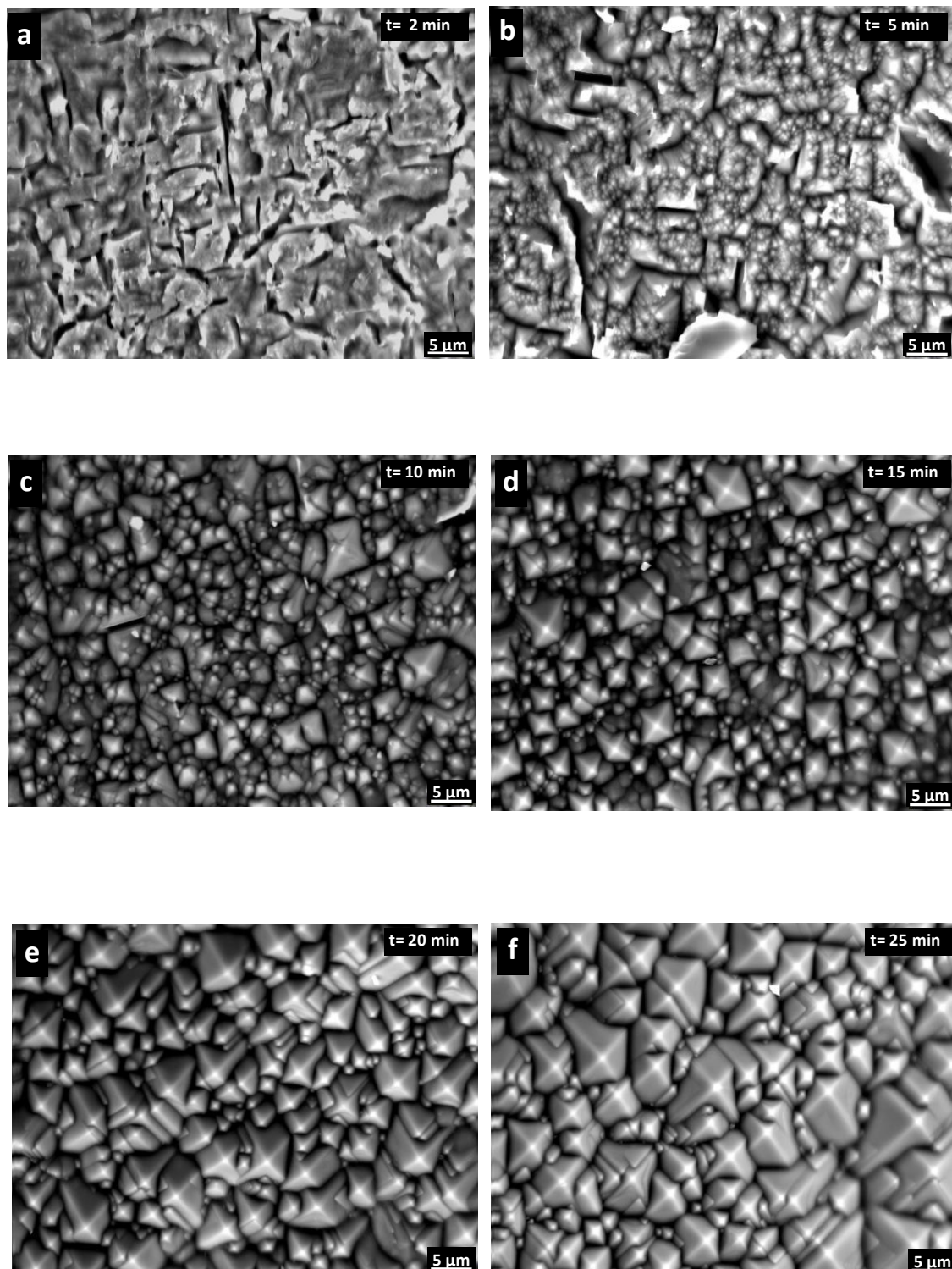


Figura 4-7 (a-f). Imágenes de SEM de la superficie de las obleas procesadas en la línea de fabricación con tiempos (t) de proceso desde 2 minutos hasta 25 minutos. La temperatura del baño para el ataque es de 86°C.

Se han tomado también fotografías por SEM del perfil de la superficie de las obleas texturizadas para cuantificar la altura de las pirámides en función del tiempo de texturizado (*Figura 4-8*). En esta serie de fotografías, se observa que el tamaño de las pirámides aumenta con el tiempo de texturizado:

- Después de 5 minutos de texturizado, (*Figura 4-8 a*), la altura de las pirámides es aproximadamente de 2 μm , aunque a este tiempo el tamaño de las mismas no es homogéneo y se pueden apreciar pirámides de distintos tamaños.
- Tras 20 minutos de texturizado, (*Figura 4-8 b*), la altura de las pirámides ha alcanzado 5 μm . Se consigue también una mayor homogeneidad en su tamaño.
- Al final del proceso, 25 minutos (*Figura 4-8 c*), la altura de las pirámides y su distribución de tamaño es bastante homogénea. Las pirámides alcanzan las 7 μm de altura.

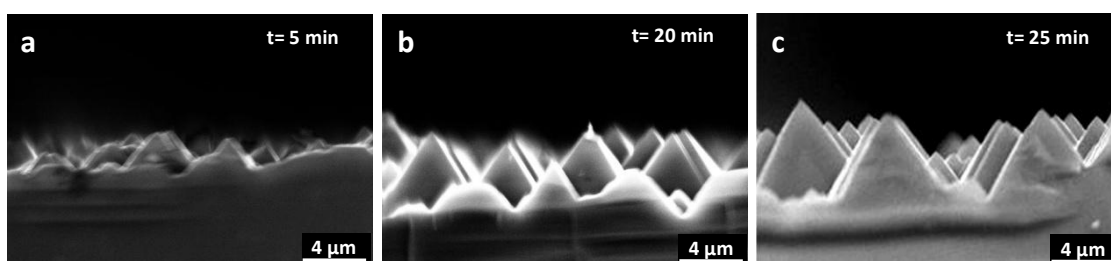


Figura 4-8. Imagen de SEM del perfil de la superficie de las obleas atacadas en las condiciones señaladas en el texto tras 5, 20 y 25 minutos de tiempo (t) de texturizado en fabrica (Figura 4-8 a, b y c respectivamente)

Para conocer la mejora efectiva en la absorción de la luz, se midieron todas las muestras en un espectrofotómetro UV-VIS-IR (*Varian, modelo Cary 5E*) con una esfera integradora. Esta permite detectar la luz reflejada más la difusa (reflectancia total) o, mediante el bloqueo del haz reflejado especularmente, sólo la difusa. Debido a la geometría de las muestras, la reflectancia total y la reflectancia difusa dan resultados prácticamente idénticos, por lo que en la *Figura 4-9* sólo se representa la reflectancia total. En dicha gráfica, se observa la reducción en la reflectancia de cada una de las

oblas obtenida a distintos tiempos de texturizado. Existe una caída inicial muy pronunciada desde la oblea de referencia sin texturizar (etiquetada como “carga”) hasta los cinco primeros minutos de texturizado. En este tiempo, es donde se produce la mayor reducción de la reflectancia, aunque, tal y como se refleja en las fotografía de SEM de la *Figura 4-7b*, las pirámides no están aún formadas. También se puede ver que, efectivamente, 25 minutos es el tiempo óptimo de proceso (a falta de muestras texturizadas a mayores tiempos de ataque), dando lugar a obleas con la menor reflectancia, aunque tan solo ligeramente por debajo de la obtenida en la oblea con 20 minutos de texturizado.

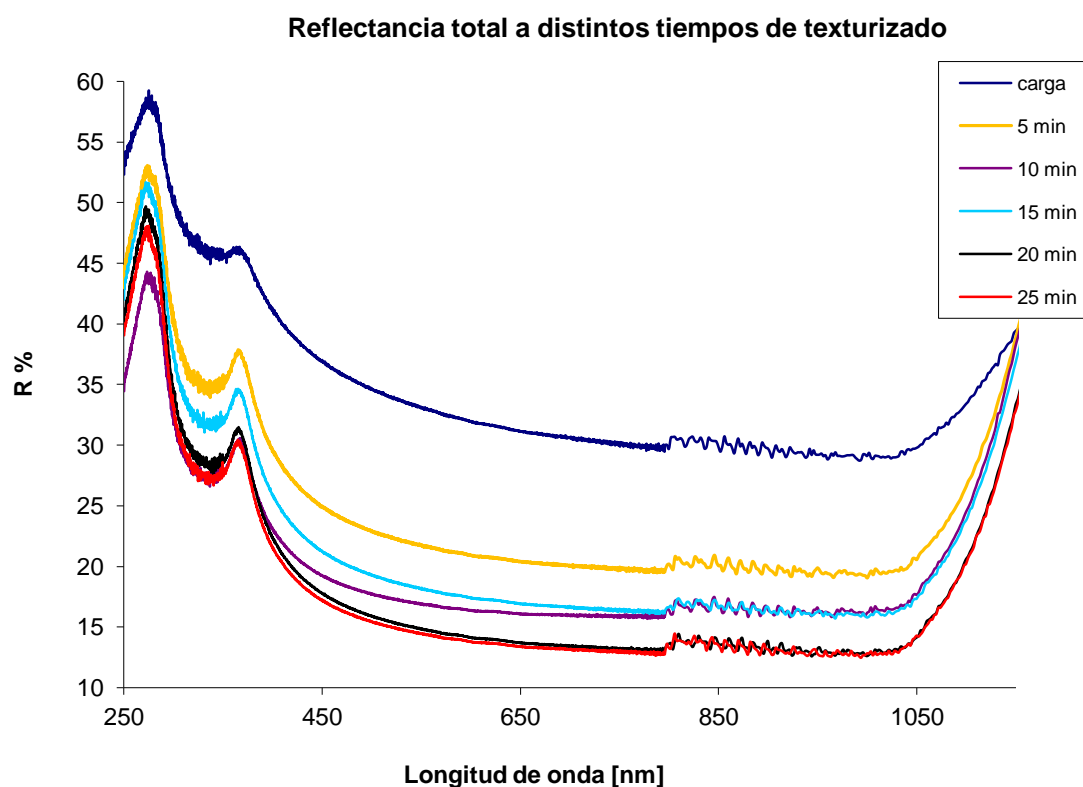


Figura 4-9. Grafica de la reflectancia total obtenida con una esfera integradora adaptada a un espectrofotómetro. Las distintas curvas corresponden a obleas extraídas del baño de fábrica a distintos tiempos de proceso, cuya superficie se muestra en la Figura 4-7.

Tal y como se ha explicado en la sección 4.1.1, el principal motivo al que se le atribuye la formación de las pirámides es la mayor compacidad de los planos (111), los cuales son más resistentes al ataque químico, produciéndose por tanto, un ataque

preferencial de los planos (100) por parte del baño caustico. El plano (111) forma un ángulo de $54,74^\circ$ con el (100), con lo cual es de esperar que los planos superficiales de las pirámides formen, con la superficie de la oblea sin texturizar, este mismo ángulo. Para comprobar este extremo, se analizó en mayor detalle la muestra con el proceso de texturizado óptimo, 25 minutos de duración, empleando SEM y AFM. La *Figura 4-10* muestra la imagen de SEM de una de las pirámides formadas en la superficie de la oblea tras el proceso de texturizado. A partir de esta imagen se puede estimar un ángulo entre las caras de las pirámides y la horizontal de $55,7^\circ$, siendo tan sólo un 1,7% más que el ángulo teórico, lo que se encuentra dentro del error experimental de la medida. Cabe señalar que para el análisis mediante SEM, la muestra ha sido orientada con respecto al detector de una manera completamente visual, lo que puede llevar a error en la correcta orientación de la pirámide y por tanto del ángulo medido.

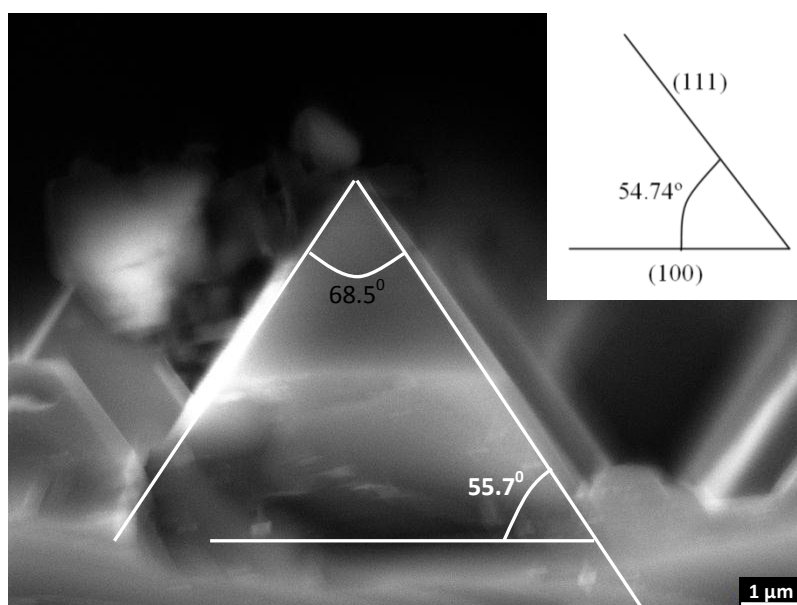


Figura 4-10. Fotografía de SEM de la sección de una pirámide formada en el proceso de texturizado de la oblea atacada durante 25 minutos

Las medidas de AFM realizadas para la estimación del ángulo entre caras de las pirámides y la superficie no atacada de la misma oblea se muestran en la *Figura 4-11*.

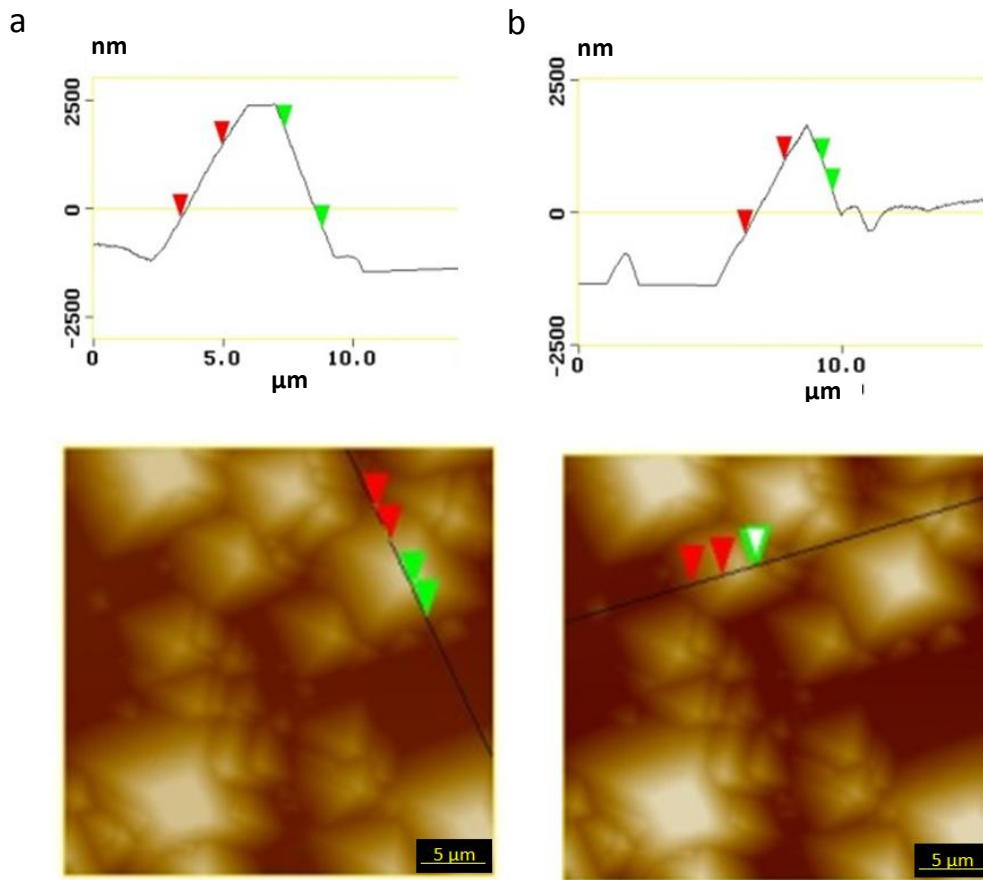


Figura 4-11. AFM en modo relieve. Obleas texturizadas a 25 minutos. En cada pirámide, el ángulo α es extraído como el promedio de los dos ángulos medidos en el recorrido representado por una línea negra.

El ángulo α que forma la superficie de las pirámides con la horizontal (superficie no atacada de la oblea) estimado a partir de las medidas de AFM mostradas en la Figura 4-11 es:

Pirámide a): $\alpha = (46.77^\circ + 57.92^\circ)/2 = 52.34^\circ$

Pirámide b): $\alpha = (42.74^\circ + 55.20^\circ)/2 = 48.97^\circ$

Como se puede comprobar, aunque próximo, este ángulo no concuerda con los $54,74^\circ$ que forman los lados de las pirámides, planos (111), con los planos (100). Una posible explicación de este hecho es que los lados de las pirámides formadas por planos (111)

podieran estar escalonados, es decir formados por pequeños tramos de planos (111) alternados con terrazas de planos (100). Esto cambiaría ligeramente el ángulo final de la pirámide. Un esquema orientativo se muestra a en la *Figura 4-12*.

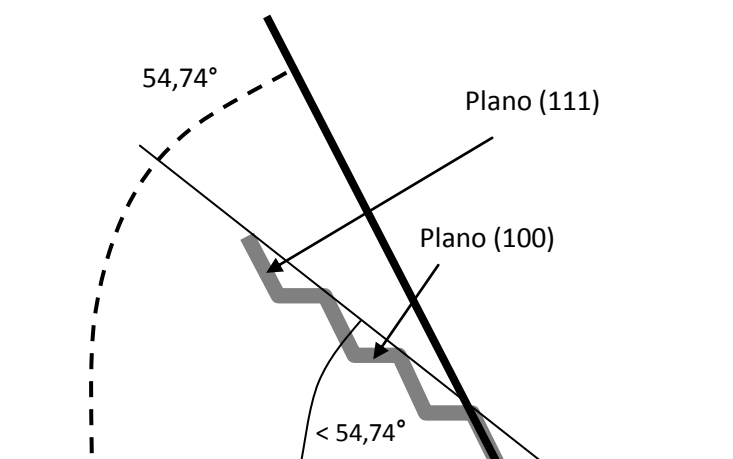


Figura 4-12. Esquema de una de las paredes de las pirámides cuadradas. Según esta hipótesis, las paredes estarían formadas por alternancia de planos (111) y (100) que darían lugar a "terrazas" y explicarían por qué el ángulo detectado es inferior al teórico.

Esta posibilidad ha sido apuntada por otros autores como Baker-Finch S. C. y McIntosh K.R. [110]. En su estudio analizan la luz retrodispersada por una oblea texturizada mediante la técnica de espectroscopia de ángulo variable. Esta técnica consiste en una esfera integradora, que integra la señal y es recogida por un espectrofotómetro. La esfera integradora es acoplada a un goniómetro de manera que se puede medir el ángulo de reflexión de la luz incidente sobre la oblea. En su trabajo, Baker-Finch y MacIntosh han medido ángulos de reflexión de entre 50° y 52° , lo que concuerda con los resultados obtenidos en este estudio. M. A. Green [123] también observó ángulos menores a los teóricos ($<54,74^\circ$), obteniendo además una dependencia entre este ángulo y la velocidad de ataque de los planos (100) y (111).

4.3.2. TEXTURIZADO EN LABORATORIO.

Dada la imposibilidad de alargar el tiempo de texturizado sin interferir en el proceso de producción de la planta de fabricación, se han realizado estudios de texturizados en el laboratorio. Así, se reprodujeron en el laboratorio los baños que se utilizan en la planta de fabricación, utilizando exactamente las mismas concentraciones de agentes químicos.

En el laboratorio, el texturado se realizó en una cubeta de Pyrex de 5 litros de capacidad (ver *Figura 4-13*). Para conservar la misma proporción entre obleas y litros de baño que se usan en la planta de fabricación, se procesaron simultáneamente 10 obleas, de las que se fue extrayendo una cada 5 minutos de proceso hasta los 45 minutos, exceptuando la primera oblea que fue extraída al cabo de 1 minuto de ataque. Los parámetros del proceso son los resumidos en la *Tabla 4-1*.

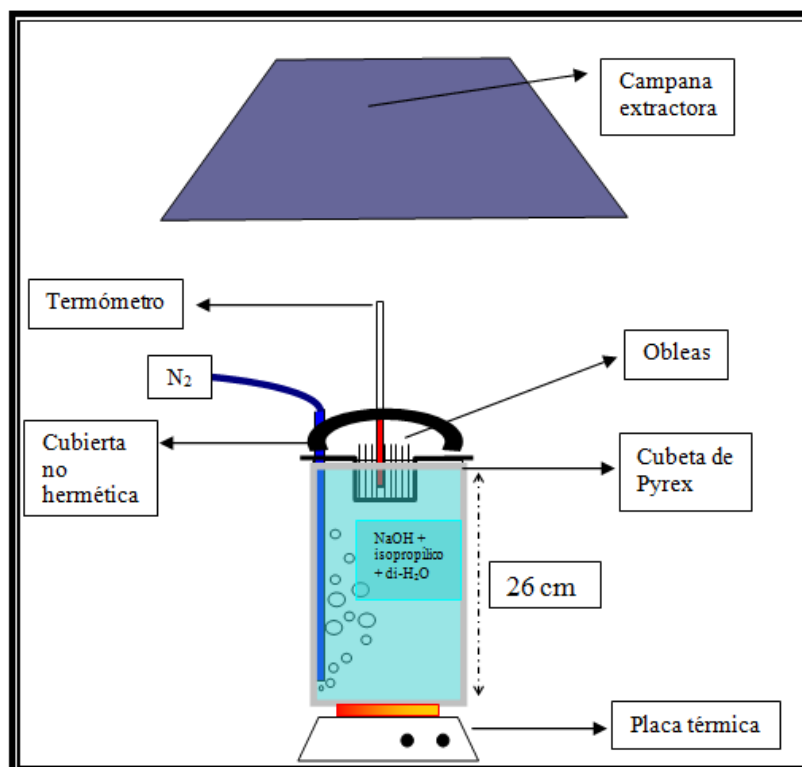


Figura 4-13. Esquema del baño y proceso de texturizado en el laboratorio

Tipo de obleas	Obleas con las mismas especificaciones técnicas que las utilizadas en la sección 4.3.1.
Pretratamiento	Limpieza con HNO ₃ tal y como viene descrito en la <i>Figura 4-5</i>
Limpieza posterior	Aclarado con agua desionizada
Temperatura	86°C. Se midió la temperatura con un termómetro colocado entre las obleas que estaban siendo procesadas
Burbujeo de N ₂	Se introduce N ₂ en el baño a través de un tubo de Teflón con la salida en el fondo. El N ₂ es de una pureza superior al 99% y se suministra a 2 bares de presión, dando lugar a un burbujeo abundante dentro del baño
Tiempo	45 minutos
Proporciones	NaOH (2% en peso) + i-C ₃ H ₇ OH (6% en peso) + H ₂ O desionizada

Tabla 4-1. Descripción del proceso de texturizado realizado en el laboratorio

En comparación con el proceso en fábrica, la temperatura está más controlada en el texturado del laboratorio. Por un lado, el rango de variación es de 2 grados mientras que en fábrica es de 3 grados, y por otro lado el termómetro se encuentra entre las obleas procesadas, mientras que en los baños de fábrica se encuentra en una esquina del fondo de las cubetas.

En una primera etapa, se sometió a las muestras a una limpieza de ácido nítrico al 4% en agua desionizada (resistividad de 18,2 MΩ·cm) y posteriormente a un aclarado con H₂O desionizada en ultrasonidos. Luego un texturizado a 86°C con sosa (al 2% en peso), isopropanol (al 6% en peso) y agua desionizada

Las muestras fueron extraídas después de distintos tiempos de ataque, a continuación aclaradas en agua desionizada con ultrasonidos y por último analizadas por SEM.

En la *Figura 4-14* se muestra una imagen de SEM de la superficie de la oblea tras un minuto de ataque en las condiciones especificadas en la *Tabla 4-1*.

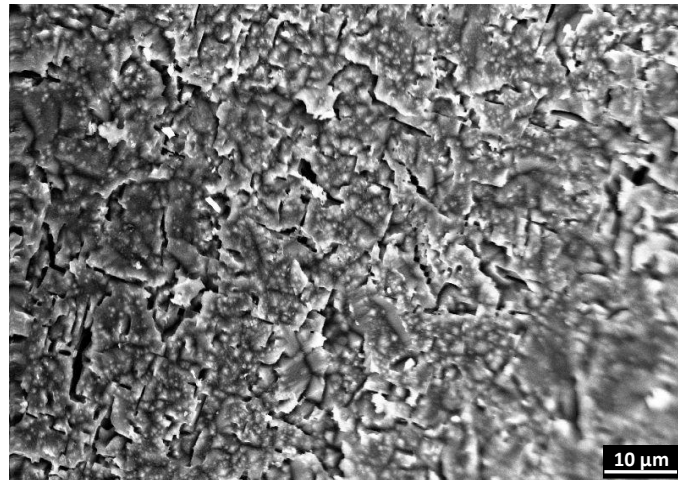


Figura 4-14. Imagen de SEM de una oblea con un minuto de ataque de NaOH. Ataque químico realizado en el laboratorio.

Se puede ver que la superficie de la oblea empieza a adquirir un aspecto granulado en comparación con la oblea sin texturizar (*Figura 4-6*). Estos granos no son otra cosa que las pirámides que se empiezan a formar.

La *Figura 4-15* muestra un detalle ampliado de la *Figura 4-14*, con la muestra inclinada 45°, haciéndose visible el inicio de la formación de las pirámides (marcadas con flechas rojas en la figura).

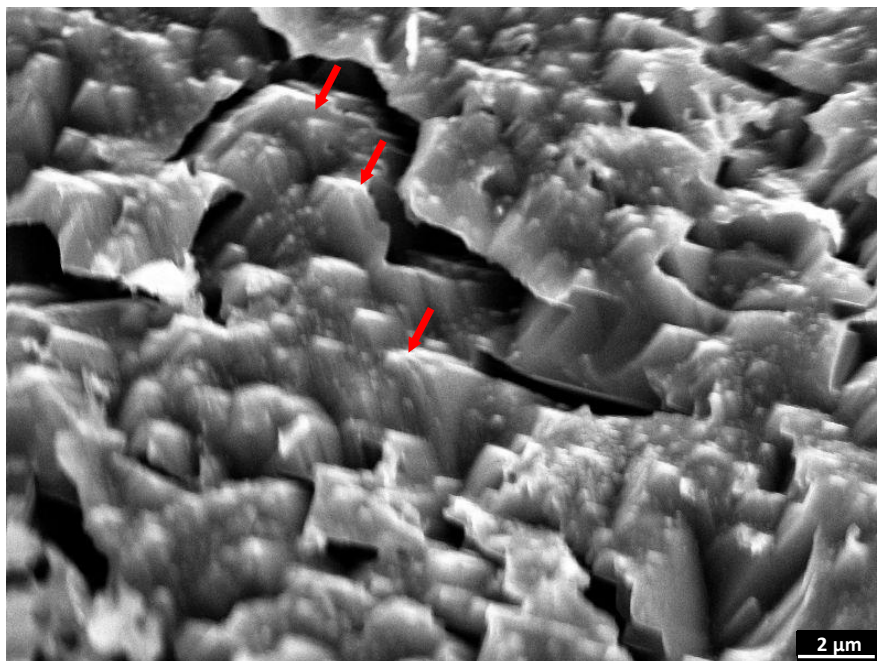


Figura 4-15. Imagen de SEM tomada con 45° de inclinación de una oblea texturizada en laboratorio durante 1 min de sosa

En la misma fotografía de la *Figura 4-15* se pueden observar defectos o grietas debidos al corte de obleas, proceso que se realiza en las fábricas de producción de obleas por el que los lingotes de silicio son cortados en “rodajas” dando lugar a las obleas. Estos defectos deben ser limpiados o atacados en los procesos de fabricación de células solares, particularmente durante el texturizado. Los mencionados defectos son observados en las imágenes de la *Figura 4-7* incluso para tiempos mayores a 5 minutos de ataque, donde aún se pueden ver en forma de grietas o fracturas.

Posteriormente a la oblea extraída a 1 minuto de ataque, las obleas se extrajeron de los baños de texturizado a tiempos de proceso desde 5 hasta 45 minutos, en intervalos de 5 minutos. De esta manera se obtienen muestras con tiempos de ataque cortos hasta tiempos de ataque muy largos, pudiendo conocer así los efectos de un tiempo prolongado, superior al tiempo utilizado en fábrica en el texturizado de las obleas.

La *Figura 4-16* (a-i) muestra las imágenes de SEM de las superficies de las obleas con distinto tiempo de proceso, realizado en el laboratorio. Según se muestra en esta figura, a los cinco minutos de proceso ya se pueden observar las pirámides distribuidas a lo largo de la superficie de la oblea. Los defectos de corte desaparecen a los 10 minutos de texturizado. Por otro lado aunque existe un sobre-ataque de las pirámides, donde estas comienzan a presentar un tamaño menor, este ocurre a tiempos bastante elevados (a partir de 35 minutos) y aún así las pirámides parecen conservar su integridad y la superficie de la oblea sigue estando completamente cubierta por las mismas.

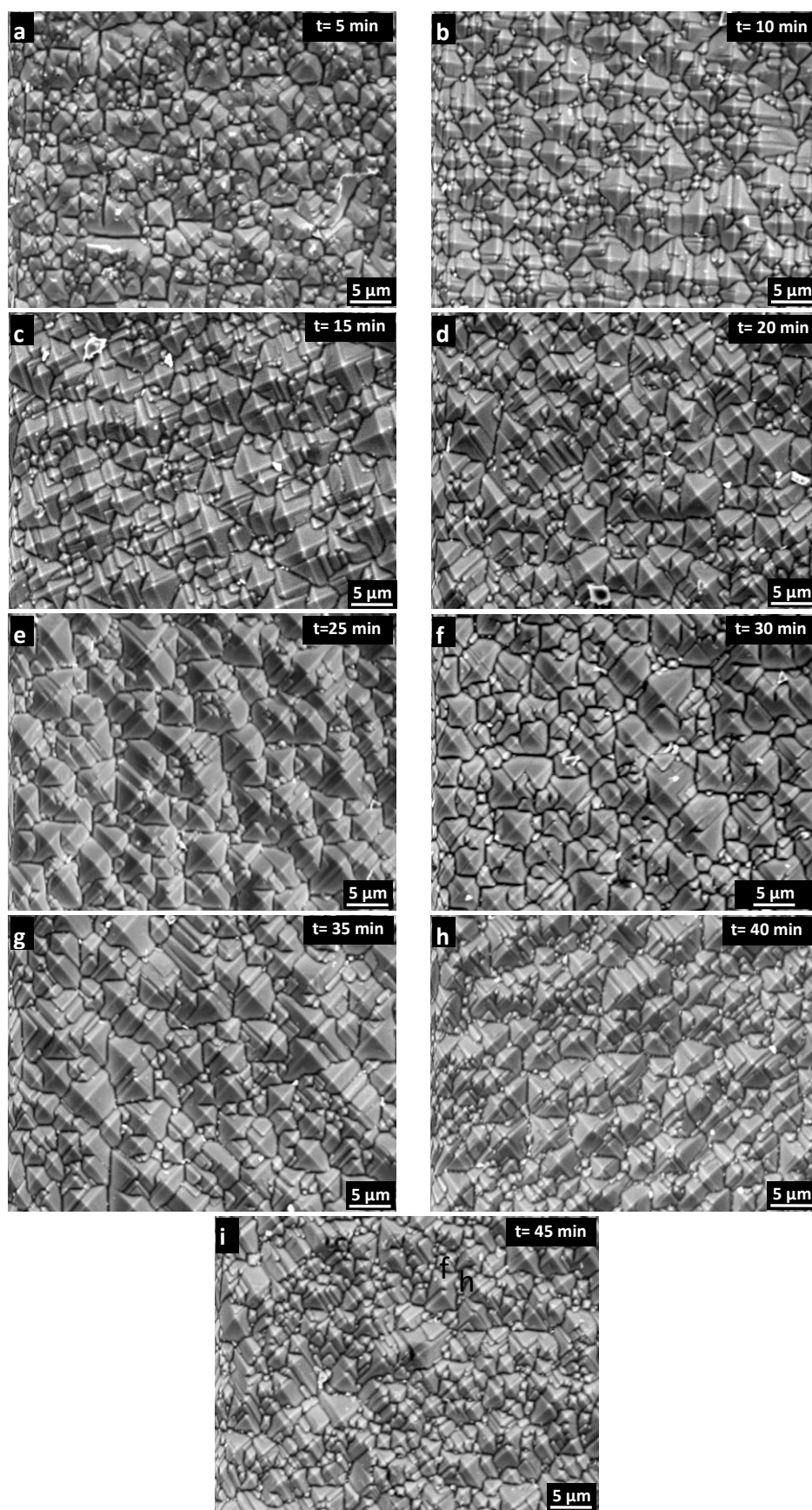


Figura 4-16 (a-i). Imágenes de SEM de la superficie de las obleas texturizadas en el laboratorio en un baño de sosa a 86°C durante distintos tiempos de ataque. El rango de tiempos de ataque (t) a los que las obleas son extraídas del baño es 5-45 minutos.

En las imágenes de SEM de la *Figura 4-17* se muestran las pirámides en sección transversal a distintos tiempos de ataque (5, 25 y 45 minutos). Como se observó en las muestras atacadas por el proceso industrial, para tiempos de ataque bajos (*Figura 4-17a*) las pirámides existentes, aunque formadas, son de pequeño tamaño e irregulares. Por otro lado, a partir de un tiempo de texturizado óptimo de 25 minutos (*Figura 4-17b*) se produce un ataque de las pirámides que conduce a disminuir su tamaño (*Figura 4-17c* después de 45 minutos de proceso).

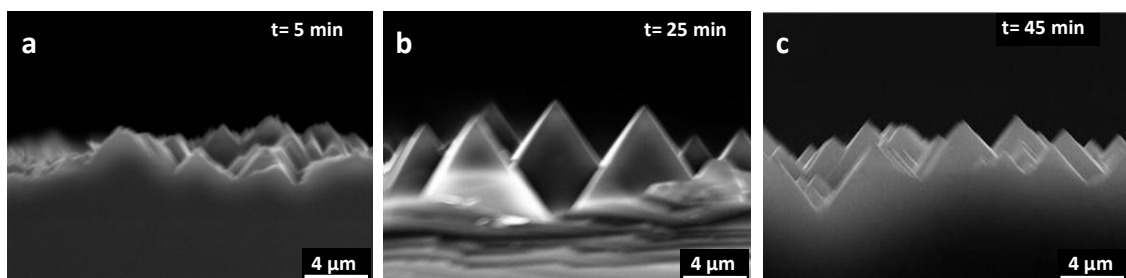


Figura 4-17. Imágenes de SEM de la sección transversal de la superficie de las obleas después de distintos tiempos (t) de texturizado en laboratorio. a) 5 minutos, b) 25 minutos y c) 45 minutos.

Las muestras, anteriormente inspeccionadas por el SEM, fueron después medidas en un espectrofotómetro con esfera integradora, donde se obtuvo la reflectancia total (reflectancia especular + difusa) y la reflectancia difusa. Al igual que en el caso industrial, debido a la geometría de las muestras, ambas dieron resultados prácticamente idénticos, con lo que sólo se representarán las gráficas de la reflectancia total (especular + difusa).

En la gráfica de la *Figura 4-18*, se representa la reflectancia de cada muestra en función de la longitud de onda. En ella se puede ver que para tiempos de ataque entre 20-35 minutos, los valores de reflectancia medidos son muy próximos. Sin embargo la oblea procesada a 30 minutos da el menor valor de reflectancia en la mayor parte del espectro. A partir de ese tiempo óptimo de texturizado, la reflectancia comienza a aumentar para tiempos de ataque más largos. En la inserción del margen superior

derecho de la *Figura 4-18*, se muestra cómo afecta el tiempo de proceso a la reflectancia (promediada en el rango de longitudes de onda de 400 nm a 800 nm, rango dentro del cual se produce el máximo de irradiancia solar), produciéndose el mínimo entre 20 y 30 minutos. Para tiempos de ataque superiores a 30 minutos se produce un sobre-ataque de las pirámides que empiezan a disminuir su tamaño (*Figura 4-17 c*), aumentándose la reflectancia de la oblea.

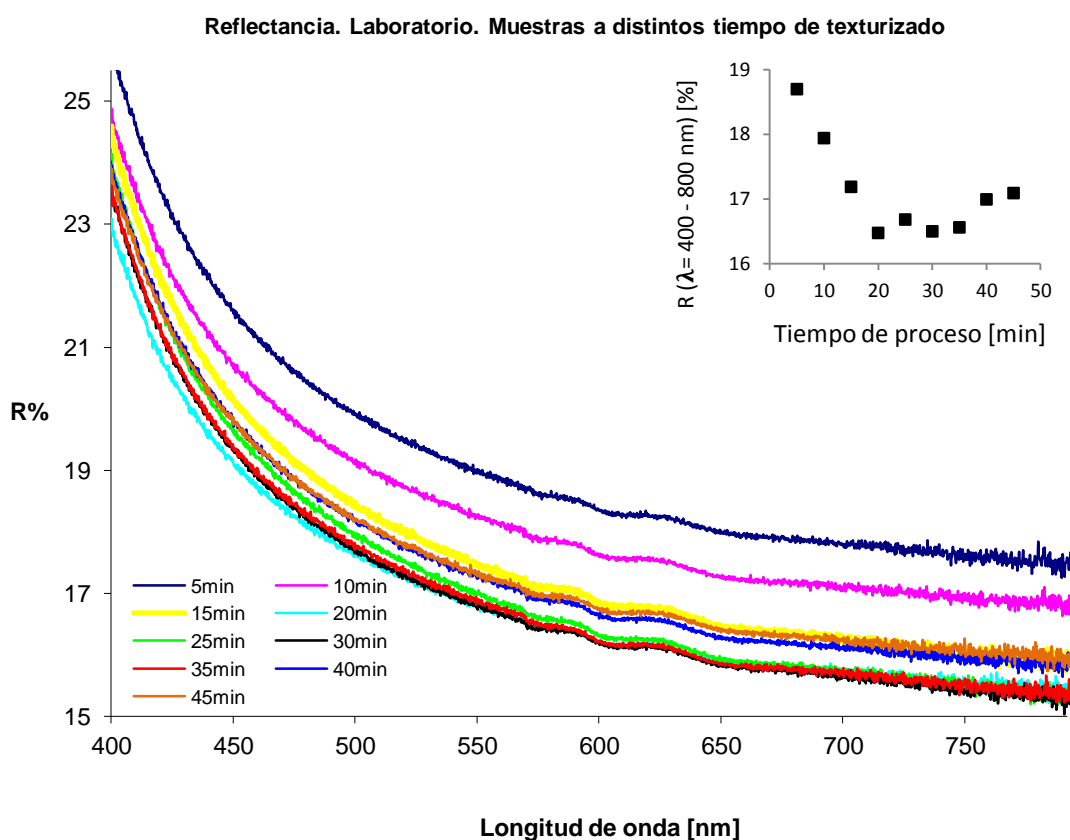


Figura 4-18. Reflectancia total en función de la longitud de onda para cada una de las muestras texturizadas en laboratorio a distintos tiempos y a una temperatura de ataque de 86°C. En la gráfica insertada se muestra la reflectancia total promediada entre 400 nm y 800 nm en función del tiempo de proceso.

Los experimentos de texturizado en laboratorio se repitieron para obleas de otro suministrador distinto. Aún cuando las especificaciones de las obleas de ambos suministradores son nominalmente las mismas, se obtuvieron tiempos óptimos de

texturizado distintos, lo que indica una gran dependencia del proceso de texturizado con la calidad estructural y superficial de la oblea de partida. En un entorno industrial, estos factores no pueden ser controlados completamente por el fabricante de células, el cual recibe las obleas como materia prima. Por este motivo, se hace necesario un método de evaluación de la calidad del texturizado que se pueda realizar *in-situ* durante el proceso de fabricación y que además sea fiable y no destructivo.

4.4. DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL GRADO DE TEXTURA DE OBLEAS MONOCRISTALINAS

4.4.1. MOTIVACIÓN Y FUNDAMENTOS

Como se ha explicado en la sección anterior (4.3) y en la Introducción (4.1), dada la sensibilidad del proceso de texturizado de las obleas monocristalinas y dados los equipos existentes para medir la textura resultante, es altamente recomendable disponer de un dispositivo para la medida de la calidad de la textura de la oblea monocristalina. Este debe ser capaz de dar un parámetro que permita cuantificar la calidad de la textura de la célula y, por tanto, cómo ésta es capaz de absorber la luz incidente. El dispositivo que se ha desarrollado se basa en el patrón de reflexión de la geometría regular de las pirámides que resultan del proceso de texturizado de obleas monocristalinas.

En el sistema de caracterización desarrollado, según se muestra en la *Figura 4-19*, la superficie texturizada se ilumina a través de una apertura practicada en una pantalla plana, la cual sirve para recoger la luz reflejada por la superficie. En lo que sigue, nos referiremos a fuentes láser, debido a su generalmente buena colimación, sin que el carácter coherente de la luz láser tenga una influencia decisiva en el sistema de medida desarrollado. Sin embargo, como se verá más adelante, sí puede ser importante el estado de polarización de la luz, ya que la reflexión que se produzca en cada una de las caras de las pirámides se ve afectada por dicho estado de polarización.

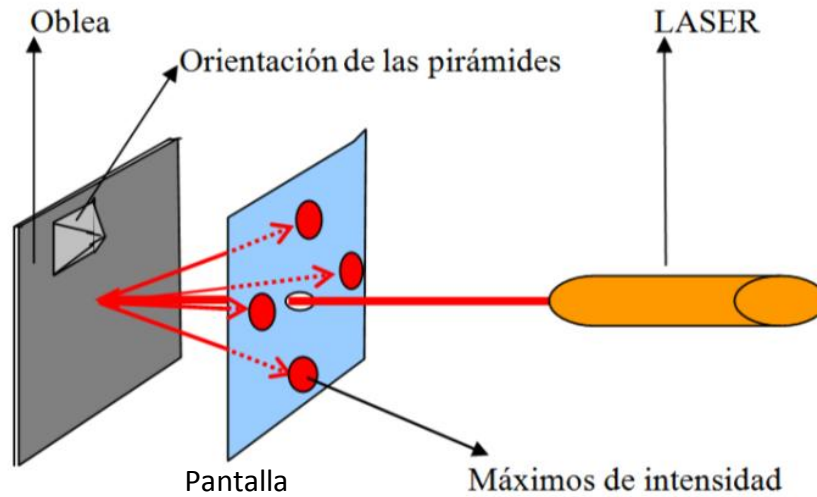


Figura 4-19. Esquema del principio de funcionamiento del dispositivo ideado

El patrón de reflexión que se observa en la pantalla plana cuando se analiza una oblea sin textura, consiste en una mancha central con simetría circular (*Figura 4-20a*) debida al esparcimiento de la luz por la rugosidad y defectos de la superficie de la oblea. Por el contrario, el patrón de reflexión óptica de las obleas con un grado de textura alto consta de la mancha central antes mencionada, si bien con menor intensidad, y de cuatro áreas circulares con simetría de orden cuatro respecto a la dirección del haz incidente (*Figura 4-20e*). Este último patrón de reflexión es debido a las reflexiones en las cuatro caras laterales de las pirámides cuadradas formadas en la oblea texturizada, ya que todas las pirámides formadas en la superficie de la oblea se encuentran alineadas en las mismas direcciones cristalográficas (ver el esquema explicativo de la *Figura 4-4*). Prueba de ello es que, al girar la oblea alrededor del eje determinado por el haz láser incidente, el patrón reflejado gira solidariamente con la oblea (*Figura 4-20 e y f*).

Las *Figura 4-20 a-f* muestran la evolución del patrón de reflexión obtenido en las obleas atacadas en la sección 4.3.1. En cada caso, la comparación de la intensidad del patrón de reflexión con simetría de orden cuatro respecto a la intensidad en reflexión normal, permite obtener una medida del grado de textura, que se relaciona con la calidad de la textura de la oblea y, por tanto, con la reflectancia de la misma.

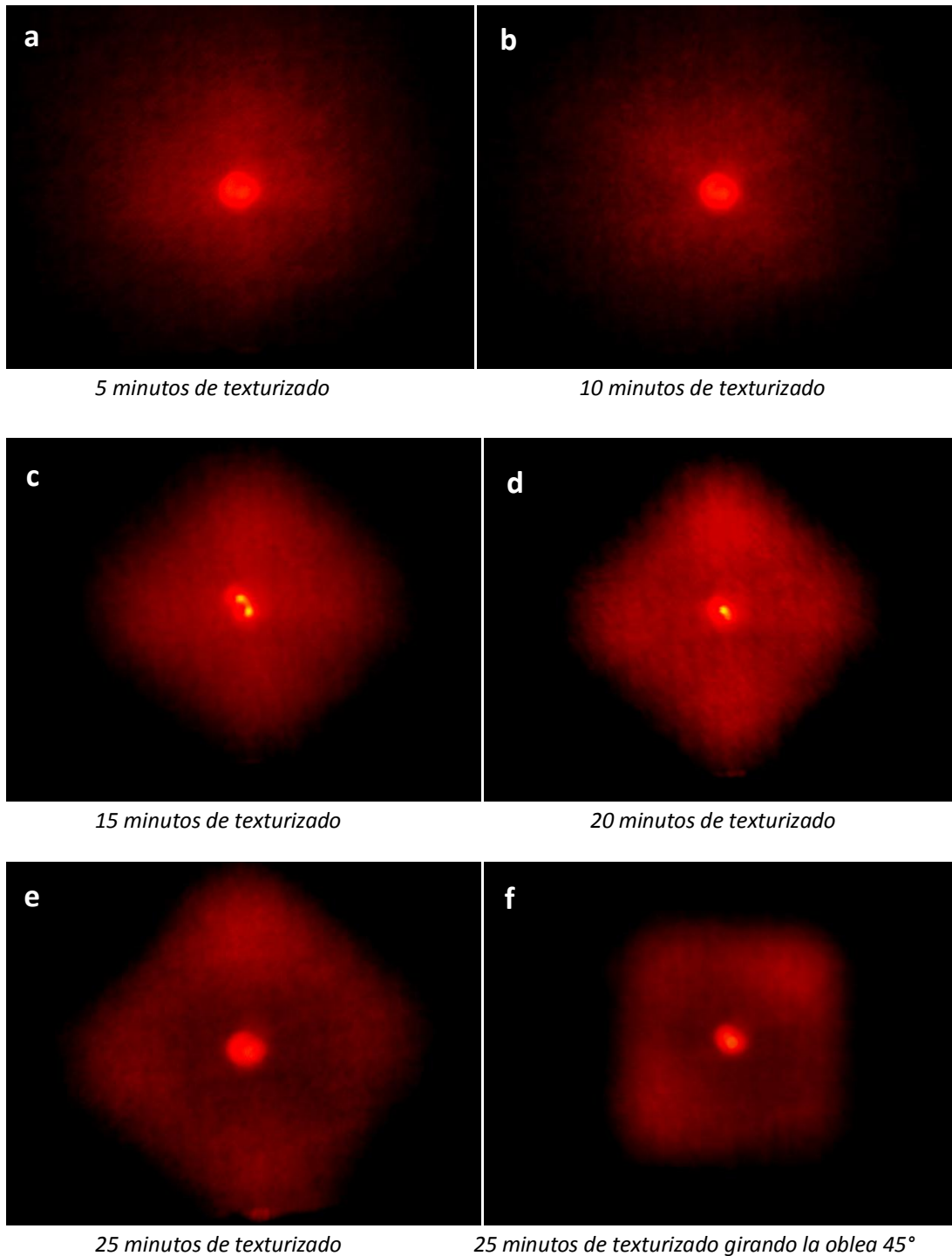


Figura 4-20. Patrones de luz reflejados por obleas texturizadas en la sección 4.3.1 en la pantalla del sistema representado en la Figura 4-19. Muestras atacadas desde 5 minutos de proceso a), hasta 25 minutos e). La fuente de luz es un láser HeNe ($\lambda=633$ nm y potencia 1,5 mW).

4.4.2. CONSTRUCCIÓN DEL PRIMER PROTOTIPO DE MEDIDA

Partiendo de la idea presentada anteriormente, se ha realizado un primer prototipo ideado para estudiar cuantitativamente las reflexiones sufridas por un haz láser que incide de manera normal a la superficie de una oblea texturizada. Para ello se medirá la intensidad de la radiación reflejada en función del ángulo, θ , con la dirección de incidencia del haz. El sistema realizado consiste fundamentalmente en un láser, un goniómetro y un fotodiodo (ver *Figura 4-21*). Este primer prototipo, aunque la oblea refleja 4 máximos de intensidad más el máximo reflejado normalmente, sólo es capaz de recoger 2 máximos de intensidad (debidos a dos de las cuatro caras de las pirámides) y el máximo de reflexión normal.

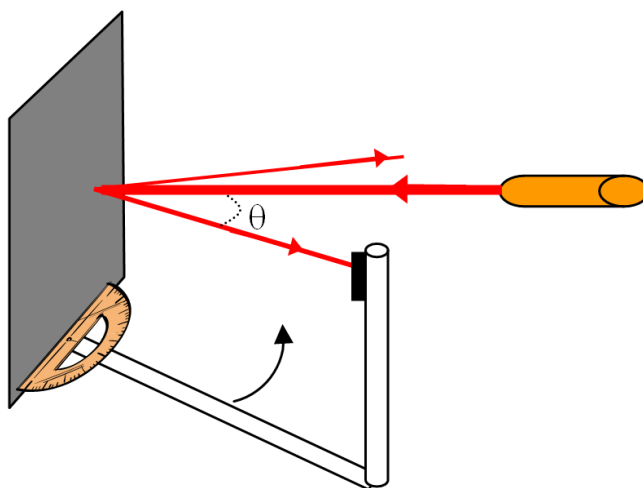


Figura 4-21. Esquema del dispositivo ideado para medir la reflexión angular de la oblea texturizada

La *Figura 4-22* muestra la intensidad detectada en función del ángulo (θ) en obleas con distinto tiempo de texturizado. Las escalas en el eje -y- de las distintas medidas han sido alteradas para una mejor visualización de las mismas. En el eje -x- se representa el ángulo al que se encuentra el detector con respecto al haz incidente, y que por tanto es el ángulo de detección del haz reflejado por la oblea. En esta gráfica se observa cómo la oblea sin texturizar posee un máximo de intensidad en la reflexión normal (0° con respecto a la normal de la superficie y 0° con respecto al haz incidente). Cuando las pirámides comienzan a aparecer, (tras 15 minutos de ataque), en la gráfica

se observa la formación de máximos secundarios (“hombros”) en el ángulo determinado por las reflexiones en las pirámides. A un grado de texturizado elevado esos hombros se transforman en máximos de intensidad absolutos (minuto 30).

Cuando se sobrepasa el tiempo óptimo de texturizado (minuto 30), las pirámides comienzan a verse atacadas y empieza a producirse un pulido de la superficie, de manera que la reflexión normal se ve de nuevo favorecida. Así el máximo central aumenta en detrimento de los máximos laterales.

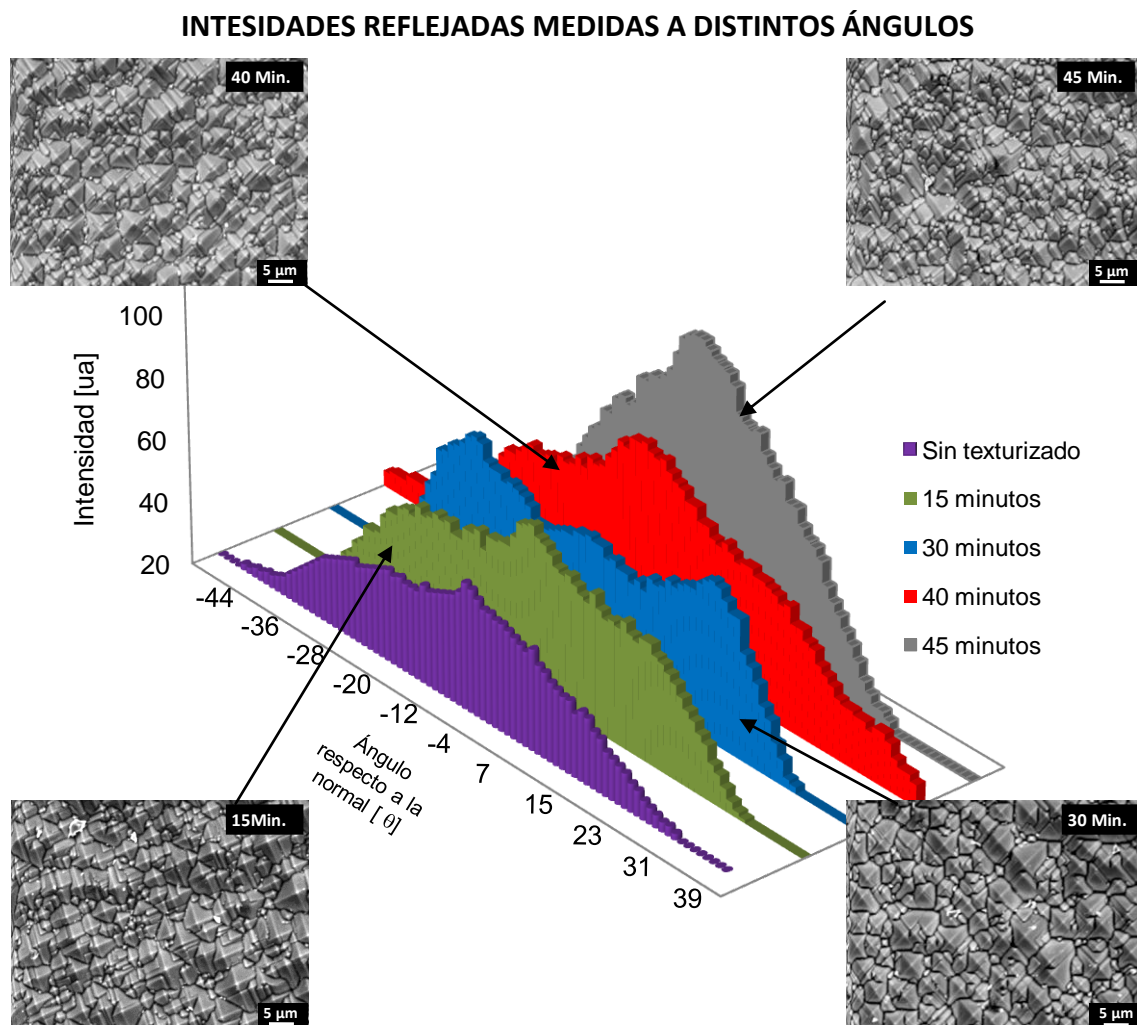


Figura 4-22. Distribución angular de la intensidad de luz reflejada medida a distintos ángulos con el dispositivo de la Figura 4-21. Los “hombros” son altos en proporción al pico central para tiempos de texturizado óptimos. La relación es contraria para tiempos de texturizado muy bajos o demasiado altos. Las imágenes de SEM insertadas muestran la superficie de la oblea analizada en cada caso. Las obleas utilizadas en esta medida son las pertenecientes al proceso en el laboratorio (sección 4.3.2).

Como se desprende de la *Figura 4-22*, los resultados obtenidos con el dispositivo permiten discriminar, de una manera cuantitativa, el grado de texturizado para diferentes tiempos de ataque.

Según se ha mostrado anteriormente, cuando las pirámides están bien formadas, las reflexiones en ellas se verán reforzadas, mientras que la reflexión normal se atenúa. De esta manera, en las gráficas de intensidad de reflexión frente a θ (*Figura 4-22*), cuanto más pronunciados sean los hombros y más bajo el pico de reflexión normal (pico central) mejor será el grado de textura. Cuando esa relación sea máxima, ese será el tiempo de texturizado óptimo. Según esto, para ver la efectividad del equipo a la hora de diferenciar tiempos de texturizado muy próximos, se representan sólo las gráficas a tiempos de 20, 25 y 30 minutos (*Figura 4-23*). Mientras que en el texturizado en la línea de fabricación el tiempo óptimo se producía tras 25 minutos (sección 4.3.1), en este caso se obtiene que para 30 minutos es cuando se produce la mayor relación entre intensidades de hombros y pico central, disminuyendo gradualmente hasta los 20 minutos. Por tanto, este sistema es capaz de distinguir entre tiempos de texturizado próximos y determinar cuál es el tiempo óptimo para conseguir una mejor textura.

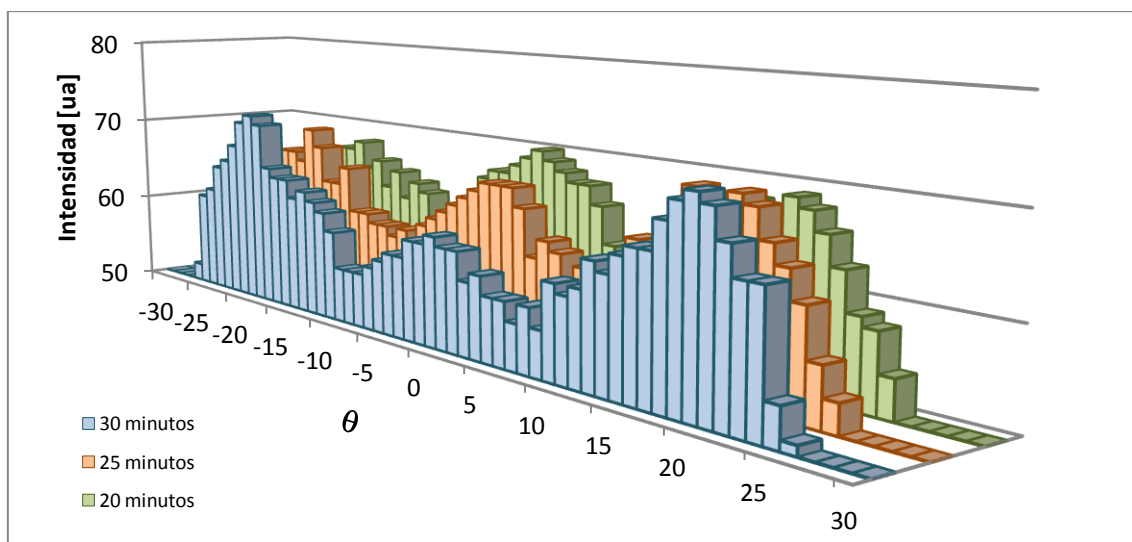


Figura 4-23. Distribución angular de la intensidad de la luz reflejada para tiempos de texturizado muy próximos al tiempo óptimo.

Si se toma, de la gráfica de la *Figura 4-23*, el ángulo para el cual se producen los hombros, aproximadamente 20° , se puede obtener, también con este método, el ángulo que forman las caras de las pirámides con la horizontal. Siguiendo una relación de reflexiones entre pirámides, representada en la *Figura 4-24*, se llega a la relación entre el ángulo de reflexión donde se producen los hombros (θ_{max}) y el ángulo de las caras de las pirámides con la horizontal (α):

$$\theta_{max} = 20 = 4\alpha - 180 \rightarrow \alpha = 50^\circ$$

Este resultado concuerda con el obtenido por el microscopio de fuerzas atómicas (AFM, ver *Figura 4-11*) y con las medidas obtenidas por Baker-Finch S.C. y McIntosh K. R. [110] y por tanto está por debajo del ángulo teórico de $54,74^\circ$. Estas medidas se repitieron con muestras provenientes de la línea de producción. En ellas, los máximos de intensidad reflejada se produjeron a $\theta_{max} \approx 26^\circ$, lo que supone un ángulo de $51,5^\circ$, cercano a los 50° conseguidos con obleas procesadas en el laboratorio.

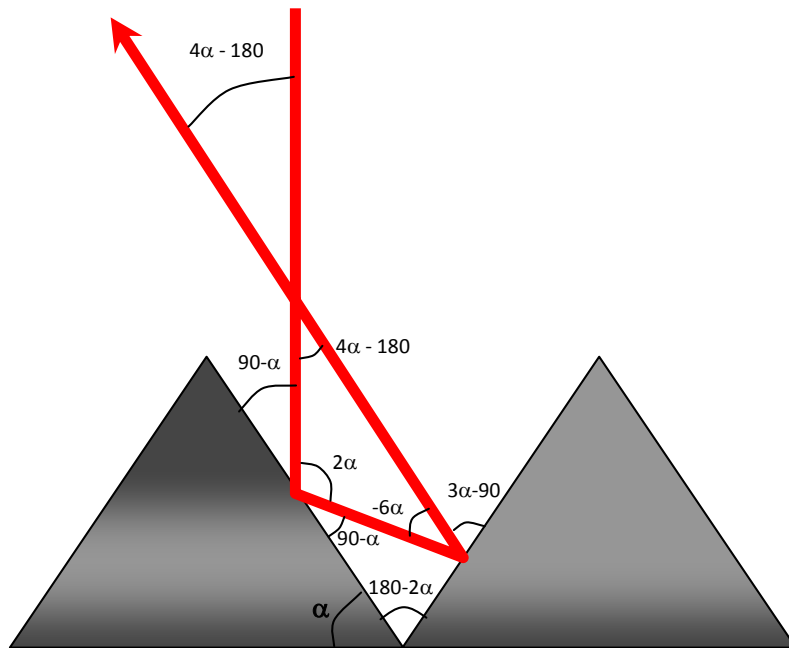


Figura 4-24. Esquema de reflexiones del haz láser en las caras de las pirámides. El ángulo entre los haces incidentes y reflejado es de $4\alpha - 180$.

Finalmente, mediante la relación entre la intensidad de la luz reflejada por las caras de las pirámides y la reflexión normal, es posible determinar la calidad de la textura formada en la superficie de la oblea, que se denominará a partir de ahora “**grado o factor de textura**”.

Para el control cuantitativo del grado de textura se utilizará la relación entre las intensidades de los dos máximos de luz laterales (u “hombros”) y el máximo de reflexión normal (o pico central) recogidos por el fotodiodo representado en la *Figura 4-21*.

Así, definiremos el factor de textura de orden dos, G_{2n} , como la relación:

$$G_{2n} = \frac{\sum_{n=1-2} I_{2n}}{I_N} \quad (4.1)$$

donde I_{2n} ($n=1-2$) es la intensidad de los picos laterales medida por el fotodiodo y I_N es la intensidad del pico central medida por el mismo fotodiodo. Idealmente, esta relación es cero para una superficie especular e ∞ para una superficie con textura piramidal perfecta. Definido de esta manera, G , no es sensible a las fluctuaciones en la intensidad del haz láser, ya que I_{2n} es linealmente proporcional a I_N . Por otro lado, como la luz reflejada normalmente es tomada como referencia (I_N), este parámetro (G) tiene la ventaja de no necesitar patrones externos para su medida.

Tanto las obleas texturizadas en la línea de fabricación (con tiempos de proceso de 5 a 25 minutos) como las texturizadas en laboratorio (con tiempos de proceso de 5 a 45 minutos) fueron medidas por dicho dispositivo, aplicándose posteriormente la ecuación (4.1). Los resultados se muestran en la *Figura 4-25a*. Esta figura es un ejemplo de cómo el parámetro G es capaz de determinar el factor de textura en función del tiempo de texturizado. Una vez más, esta gráfica indica que las obleas texturizadas en el laboratorio muestran un máximo en el factor de textura, G , que se

produce cuando la textura es óptima (30 minutos). Sin embargo las obleas texturizadas en la línea de producción muestran una cinética de proceso diferente y el máximo observado en el factor de textura ocurre a 25 minutos. Por limitaciones impuestas en producción se carece de muestras industriales a mayores tiempos de proceso.

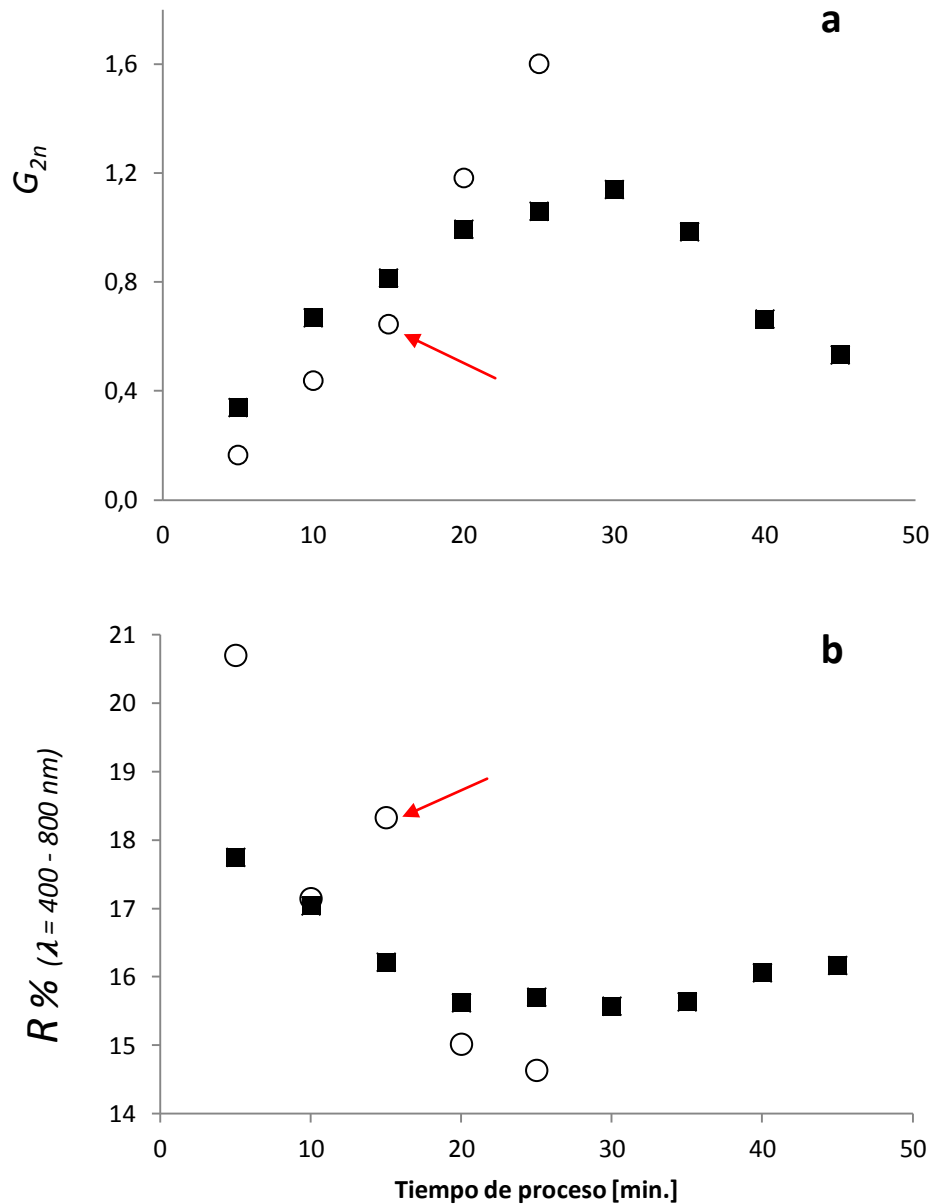


Figura 4-25. a) Factor de textura en función del tiempo de proceso para obleas procesadas en la línea de producción (símbolos huecos) y en laboratorio (símbolos llenos) b) Reflectancia promediada entre 400 nm y 800 nm en función del tiempo de proceso para obleas procesadas en la línea de producción (símbolos huecos) y en laboratorio (símbolos llenos)

En la *Figura 4-25b*, la reflectancia promediada en el rango de longitudes de onda de 400 nm a 800 nm, proporciona un valor muy alto para el tiempo de ataque de 15 minutos (indicado con una flecha), alejándose de la tendencia decreciente con el tiempo de proceso. Sin embargo esto no es detectado por el factor de textura para el mismo tiempo de ataque (ver *Figura 4-25 a*). Esto puede ser debido a que la reflectancia recoge la influencia de otros factores, como pueden ser manchas debidas a un mal secado, que contribuyen a alterar la misma, en este caso incrementándola. Debido a que el factor de textura resulta de una división de intensidades (las dos intensidades reflejadas por las caras de las pirámides, divididas entre la intensidad reflejada normalmente), esas variaciones de la reflectancia provocadas no por una textura, sino por manchas o capas anti-reflectantes, se cancelan. Por tanto, el factor de textura sólo representa la calidad de la textura y la reflectancia debida exclusivamente a la textura. Por lo que el factor G sólo es útil para caracterizar los procesos de texturizado de obleas monocristalinas.

4.4.3. CONSTRUCCIÓN DEL SEGUNDO PROTOTIPO Y MÉTODO DE MEDIDA.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se construyó un sistema completo de medida del grado de texturizado de obleas texturizadas. El dispositivo consta de una placa de circuito impreso (PCI) con una apertura practicada en el centro de la misma por el que pasará el haz láser incidente (ver *Figura 4-26 a*). La radiación reflejada por la superficie de la oblea es detectada mediante cuatro fotodiodos de silicio (modelo BPW34 y área activa $7,5 \text{ mm}^2$), situados en cuatro posiciones simétricas alrededor del agujero central. Estos cuatro fotodiodos se denominarán fotodiodos concéntricos y están dispuestos de manera que las distancias entre ellos son iguales, formando así un cuadrado. Estos fotodiodos recogen la luz reflejada por las caras de las pirámides y envían una señal en forma de corriente a un multímetro digital que posteriormente se almacena como un fichero de datos.

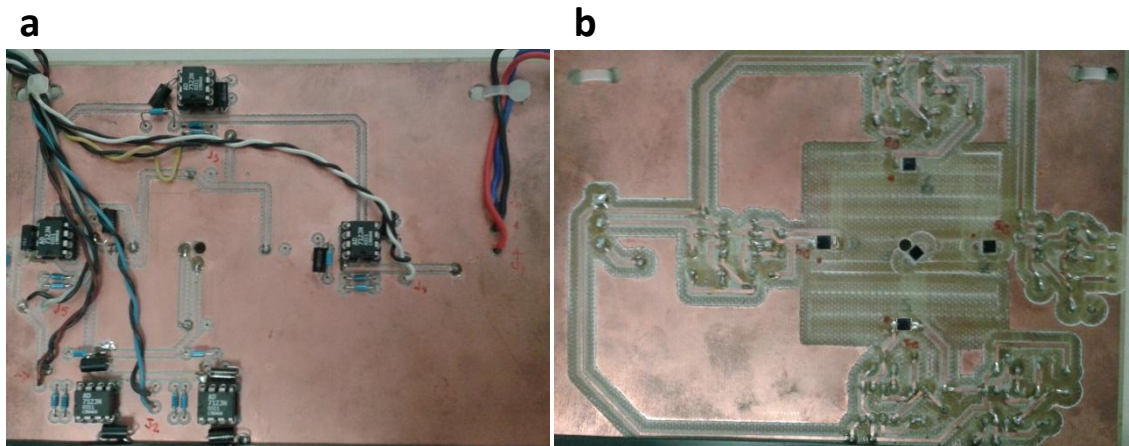


Figura 4-26. a) Cara posterior de la PCI. b) Cara frontal (mirando a la oblea) con los 5 fotodiodos. El diodo central se encuentra junto al agujero de la PCI.

Un quinto fotodiodo (ver *Figura 4-26 b*), denominado central, situado en las proximidades del agujero central, se usa para tener una referencia de la intensidad de luz reflejada normalmente. La luz reflejada normalmente está relacionada con toda superficie de la célula que refleja perpendicularmente la luz que incide a 0° . Se supone, por tanto, que esa superficie no está formada por pirámides, siendo considerada como defecto de textura. Sin embargo, es posible que la superficie de la oblea esté completamente cubierta de pirámides y que estas estén truncadas, es decir, con la punta cortada. Esto es habitual en las líneas de fabricación cuando las obleas (o células) son colocadas unas encima de otras, produciéndose abrasión entre ellas. Sin embargo esto es igualmente un defecto de textura (aunque no del proceso de texturizado) que puede derivar incluso en *shunts* y puntos calientes (ver sección 2.1), con lo que el dispositivo propuesto lo recogería como tal. Un ejemplo de este efecto se presenta en la *Figura 4-27*, que pertenece a una oblea texturizada, la cual fue apilada con otras obleas. La fricción entre ellas dio lugar al truncado de pirámides.

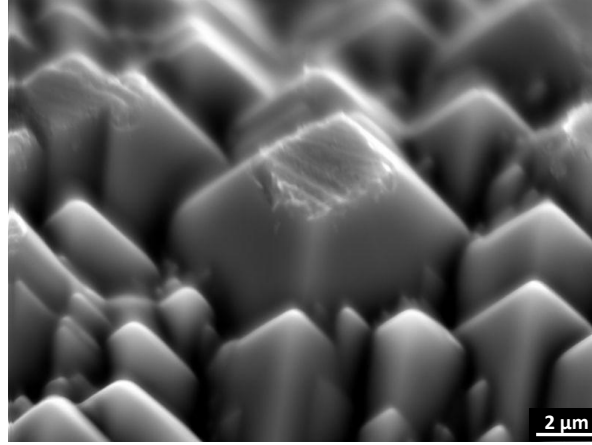


Figura 4-27. Fotografía de SEM de pirámides truncadas debido a la abrasión

En concreto, en este prototipo desarrollado, los fotodiodos concéntricos se situaron a 4 cm del agujero central, aunque esta distancia no es importante, ya que solo afecta a la altura a la que se debe poner la placa con respecto a la oblea. Con el fin de optimizar el equipo para recoger la señal, independientemente del ángulo de reflexión, antes de la medida se mueve la PCI a lo largo del eje vertical (ver *Figura 4-30*) y se fija la altura cuando todos los fotodiodos recogen un máximo de intensidad.

Un aspecto técnico que conviene tener en cuenta previamente a la implementación del dispositivo de medida, es la influencia del estado de polarización de la luz incidente en la medida de intensidad de la luz reflejada. Suponiendo luz linealmente polarizada, los coeficientes de reflexión para las componentes paralela y perpendicular al plano de incidencia, denominadas π y σ respectivamente, vienen dados por las relaciones (4.2) y (4.3):

$$r_{\pi} = \frac{n_1 \cos \theta_r - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_r + n_2 \cos \theta_i} \quad (4.2)$$

$$r_{\sigma} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_r}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_r} \quad (4.3)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción del medio incidente y reflector respectivamente [124]. Los ángulos θ_i y θ_r , así como las direcciones σ y π , están definidas en la *Figura 4-28*:

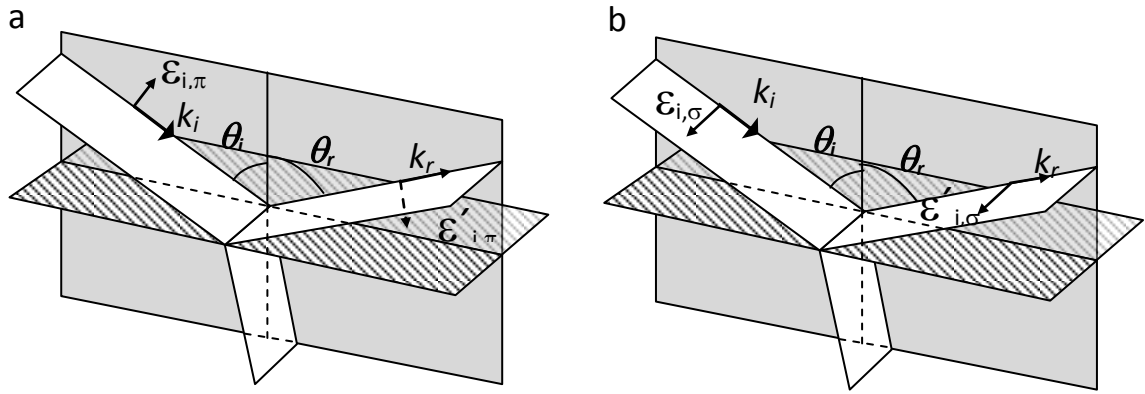


Figura 4-28. Campo eléctrico de las ondas incidente (i), reflejada (r) y refractada para la polarización paralela al plano de incidencia, indicada con el subíndice π (figura 4.68a) y perpendicular al plano de incidencia, indicada con el subíndice σ (figura 4.68b)

Debido a la simetría de orden 4 de las pirámides cuadradas, un estado de polarización de la luz que sea σ para dos caras opuestas de la pirámide, es π en las dos caras restantes (ver Figura 4-29). Por tanto, en este caso, sería esperable que las respuestas medidas por los fotodiodos concéntricos estuvieran asociadas por pares opuestos.

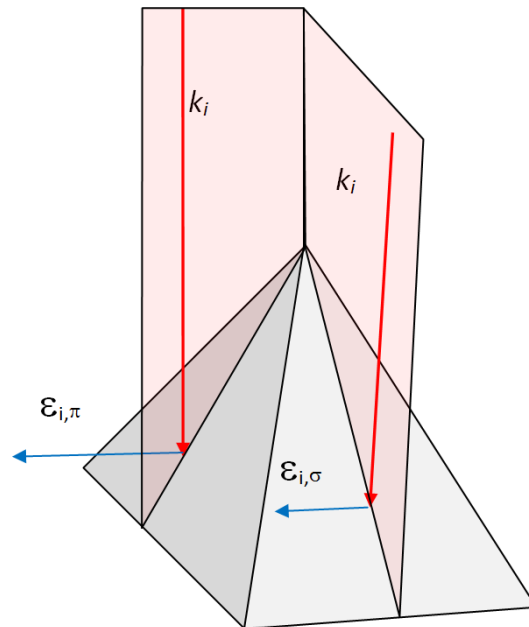


Figura 4-29. Relación entre la polarización del haz incidente y la geometría de una pirámide de base cuadrada. Un único estado de polarización incidente debe etiquetarse como σ en dos caras y π en las otras dos.

Para estudiar la influencia de la polarización de la luz en los resultados obtenidos, se utilizó el prototipo representado en la *Figura 4-30*, con la placa de diodos posicionada para detectar los máximos de intensidad. Un láser de HeNe (1,5 mW, $\lambda=633$ nm, divergencia 1,5 mrad, polarización lineal y un diámetro de haz de 0,49 mm) fue dispuesto de manera vertical en un soporte. La placa de circuito integrado con los fotodiodos, que es solidaria con el láser, se dispuso horizontalmente en el mismo soporte, alineando su apertura central con el haz láser (*Figura 4-30*). El soporte vertical está unido a una mesa X-Y donde se coloca la oblea que va a ser medida. Esa mesa permite mover la oblea en las dos direcciones mientras que el haz del láser, que está fijo, incide sobre la superficie de la misma. De esta manera podemos realizar un barrido de toda la superficie de la oblea al mover esta debajo del haz láser fijo. La resolución espacial de la medida está asociada al diámetro del haz láser.

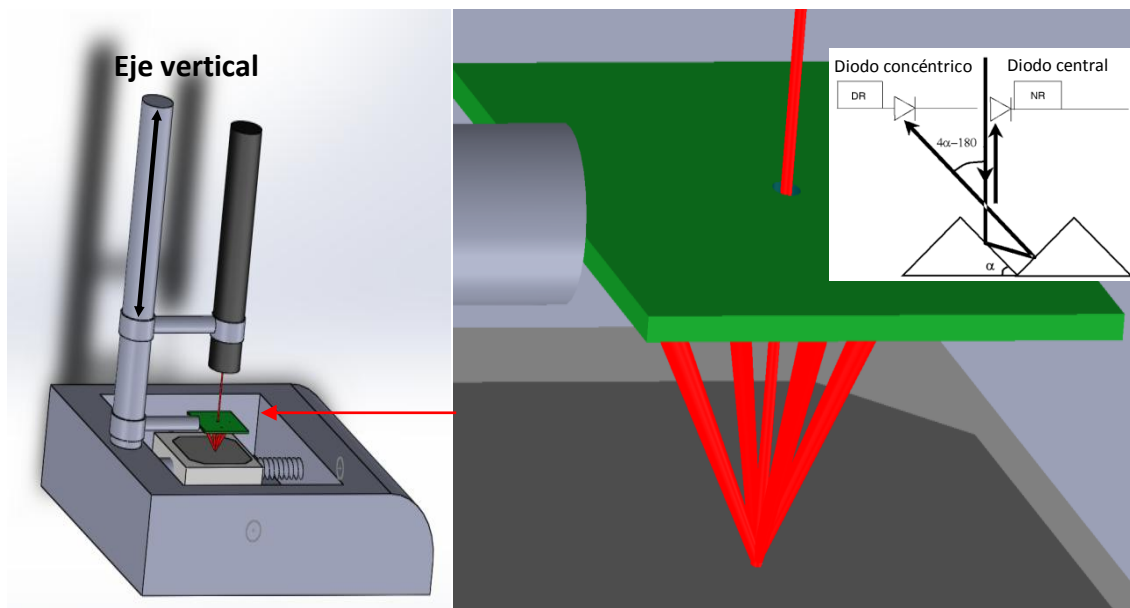


Figura 4-30. Dispositivo fabricado para realizar el estudio del grado de textura en toda la superficie de la oblea. En el inserto se esquematiza el principio de funcionamiento del dispositivo.

Con esta configuración se midieron las intensidades de la luz reflejada por medio de los cuatro diodos concéntricos y del diodo central. Se hizo incidir sobre la oblea,

texturizada a tiempo óptimo, el haz láser cuya salida está polarizada linealmente. Para obtener el caso más desfavorable, se giró el láser con respecto a su eje óptico, hasta maximizar la diferencia de señal entre pares de fotodiodos opuestos. En esta configuración (esquemática en la *Figura 4-31*) se obtuvieron los resultados mostrados en la *Figura 4-32a*.

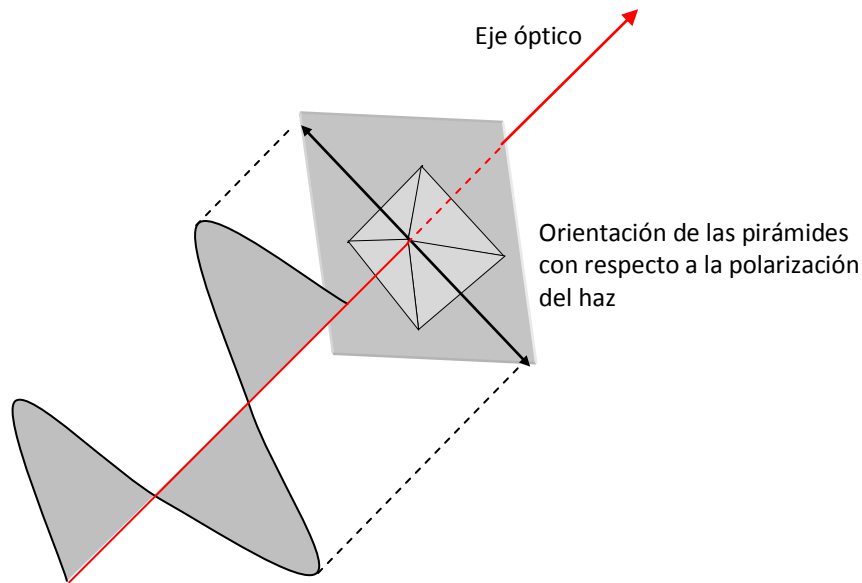


Figura 4-31. Esquema de la polarización de la luz alineada para el caso más desfavorable. Se muestra en el esquema la orientación de las pirámides con respecto a ángulo de polarización de la luz linealmente polarizada.

En las gráficas de la *Figura 4-32*, los símbolos llenos representan la intensidad medida por cada uno de los diodos concéntricos en distintas posiciones de la oblea, mientras que los símbolos huecos representan la intensidad medida por el diodo central. Las medidas se han realizado haciendo incidir el láser en distintas posiciones de la oblea.

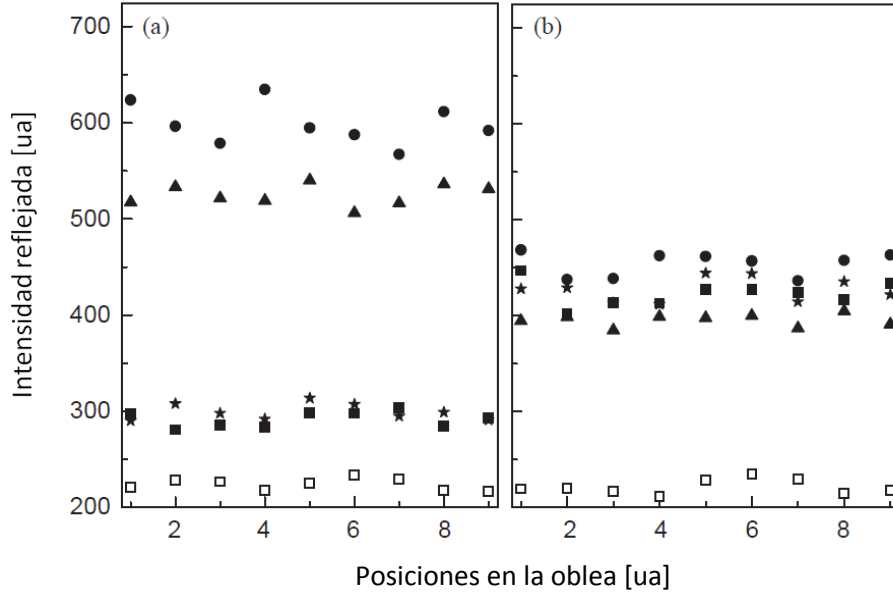


Figura 4-32. Intensidad de luz reflejada medida por los 4 fotodiodos concéntricos (símbolos llenos) y por el diodo central (símbolos huecos). a) Caso de polarización lineal del haz incidente, representado en la Figura 4-31 y b) caso de polarización circular del haz incidente.

La reflexión de la luz polarizada linealmente es más intensa en dos de los fotodiodos enfrentados (ver Figura 4-32a). Esta anisotropía de la reflexión observada se atribuye a las diferentes contribuciones de las componentes σ y π [124] de la luz incidente sobre las pirámides, tal y como se ha explicado previamente. Cabe comentar que el estado de polarización de la luz no influye en el primer prototipo, ya que este sólo recoge la intensidad de la luz reflejada por las dos caras opuestas de las pirámides, en las que el plano de incidencia es el mismo. En el caso del segundo prototipo, por el contrario, la anisotropía de la reflectividad no es deseable para el desarrollo del dispositivo de cuantificación de la textura de las células. Esta puede evitarse utilizando luz no polarizada o bien circularmente polarizada, lo que se puede conseguir haciendo pasar la luz láser, linealmente polarizada, por una lámina $\lambda/4$. La Figura 4-32b, muestra la intensidad reflejada detectada por los cinco fotodiodos cuando se emplea luz incidente circularmente polarizada. Como se puede observar, en este caso se obtiene, aproximadamente, la misma intensidad reflejada en los cuatro fotodiodos concéntricos.

Por su parte, la reflexión normal (símbolos huecos) no experimenta ninguna variación entre el caso de luz linealmente polarizada (caso *a*) y el de luz circularmente polarizada (caso *b*), ya que ésta se asocia a la reflexión en el fondo plano de la oblea, esto es, la superficie residual no texturizada o dañada de la oblea.

Para la incorporación del sistema en línea de producción se requiere un análisis bidimensional de la oblea, que típicamente tiene forma pseudo-cuadrada y aproximadamente un diámetro de 200 mm. Este análisis puede realizarse mediante un barrido xy de la oblea, por desplazamiento de ésta o del sistema óptico de proyección. No obstante los elementos móviles complican el diseño y a largo plazo requieren recalibración y mantenimiento.

Con el fin de probar el prototipo descrito en la *Figura 4-30*, para el que se miden simultáneamente los cuatro máximos de intensidad además del haz reflejado, se tomó una muestra de oblea (de 40 x 40 mm) texturizada durante 25 minutos y se sumergió la mitad de la misma en un baño de NaOH al 12% durante 2 minutos y a una temperatura de 70°C. De esta manera provocamos un sobre-ataque de las pirámides en la mitad sumergida de la oblea.

Posteriormente la reflectividad de la oblea fue estudiada con el prototipo mostrado en la *Figura 4-30* empleando una lámina $\lambda/4$ para obtener luz circularmente polarizada y por último analizada por SEM. El grado de textura fue obtenido mediante la ecuación (4.4), la cual se deriva de extrapolar la ecuación (4.1) a una simetría de orden 4. En la ecuación (4.4) se introdujeron las intensidades dadas por los cuatro diodos laterales (I_{4n} para $n=1-4$) y el diodo central (I_N) del sistema (*Figura 4-26*).

$$G = \frac{\sum_{n=1-4} I_{4n}}{I_N} \quad (4.4)$$

Los resultados del factor de textura en función del área escaneada (con ataque óptimo o sobreatacada) se muestran en la *Figura 4-33*, donde también se presentan las imágenes de SEM tomadas en las áreas de la oblea especificadas:

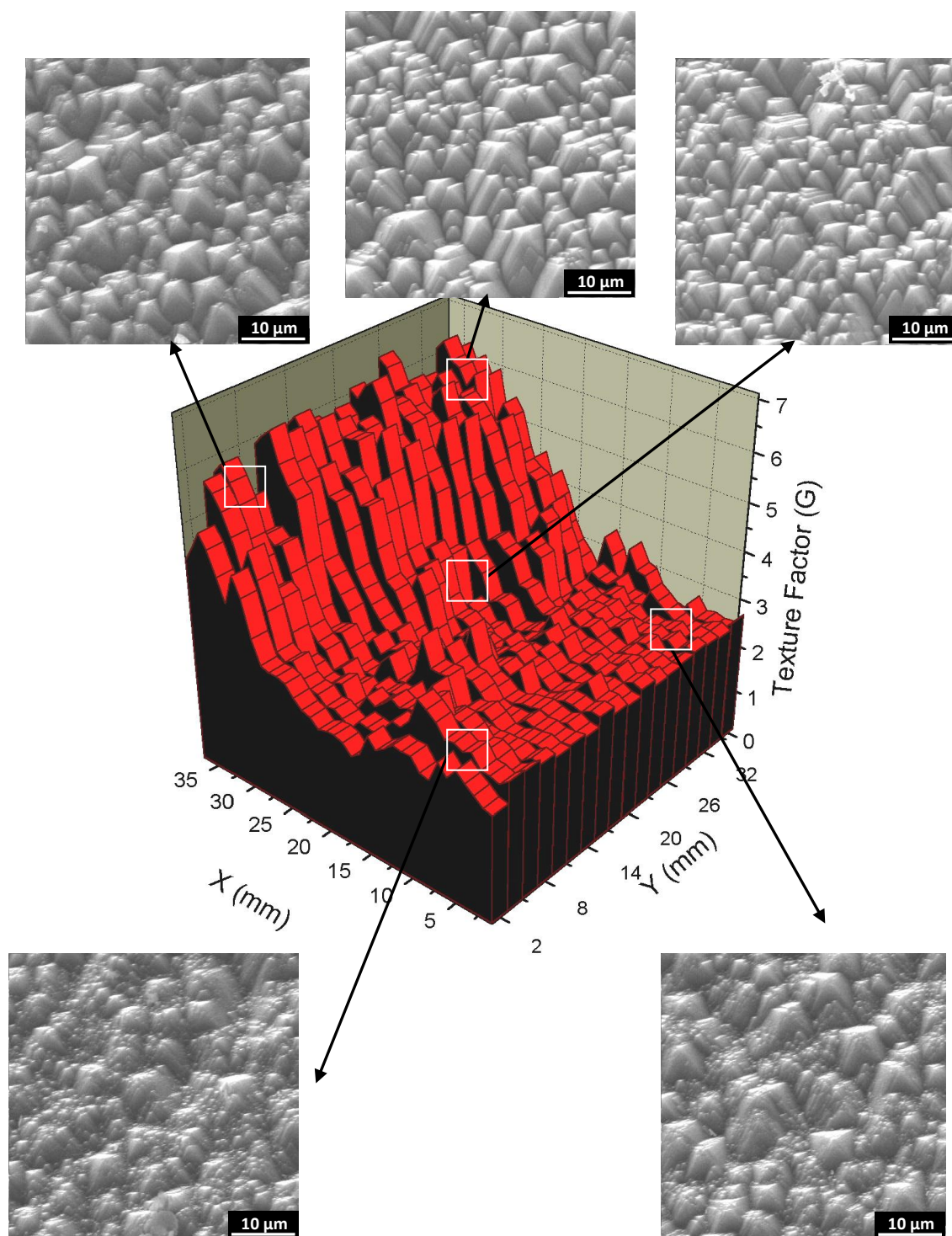


Figura 4-33. Gráfica del factor de textura G en función de la posición de la oblea estudiada. La luz incidente ha sido polarizada circularmente mediante una lámina $\lambda/4$ con el propósito de evitar reflexiones preferentes. Las imágenes de SEM muestran el estado de la superficie en las áreas de la muestra indicadas.

La *Figura 4-33* muestra una correspondencia entre las zonas con un factor de textura bajo y la imagen superficial obtenida por SEM. Así en la parte inferior de la oblea (para valores de X bajos) donde esta ha sido sobre-atacada intencionadamente con baños de alta concentración de NaOH, G presenta valores bajos. Además, las fotografías de SEM revelan en esa parte, una superficie con pirámides muy atacadas, pequeñas e irregulares. Por otro lado, en la zona donde no se ha producido sobre-ataque (parte de la oblea ya texturizada que no se ha sumergido en los baños) los altos valores de G (>5) corresponden a imágenes de SEM con textura óptima.

4.4.4. CONCLUSIONES

En este capítulo se han investigado los procesos de texturizado de las obleas monocristalinas para disminuir la reflectancia óptica de las mismas. Los resultados obtenidos muestran una elevada sensibilidad de este proceso a variables tales como calidad inicial de la oblea o el tiempo de proceso.

Se ha demostrado que la medida de la reflectancia, resuelta en ángulo, de luz no polarizada (o circularmente polarizada) sobre una oblea monocristalina texturizada, permite estimar el grado y la calidad de la textura superficial de la misma. Basándose en este principio, se ha desarrollado un dispositivo capaz de medir la calidad de textura de las obleas a partir de la relación entre la intensidad reflejada por las caras de las pirámides generadas en la superficie texturizada y la reflejada perpendicularmente cuando un haz láser, con luz circularmente polarizada, incide normalmente a la superficie de la oblea. El sistema se ha empleado satisfactoriamente para estimar el grado de texturizado de obleas de silicio monocristalino sometidas a baños caústicos, obteniéndose además una relación directa entre el grado de texturizado superficial (o factor de textura) de la oblea y la reflectancia de la misma (*Figura 4-25*). La resolución espacial de barrido del sistema depende del diámetro del haz láser empleado. En nuestro caso es de 0,5 mm de diámetro. Además, experimentos realizados

posteriormente muestran que el sistema puede ser aplicado tanto a obleas texturizadas como a células.

El prototipo, basado en cinco fotodiodos, presentado en este capítulo ha sido patentado, incluyéndose en la patente una automatización del sistema que redunde en tiempos de barrido reducidos (Zaldo *et al* [125]). Finalmente una última variante de este principio ha sido creada y construida en el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM), perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) [126], consistente en el uso de un espejo giratorio y una lente que permite realizar el barrido de la oblea o célula. En lugar de cuatro fotodiodos, dos hileras de fotodiodos miden la luz reflejada en cada pasada del haz por la oblea o célula. La oblea es desplazada en una sola dirección a una velocidad de 3cm/s. Este dispositivo, descrito en los estudios independientes de D. M. Cambre [126] y H. Mäckel *et al* [127], ha demostrado ya su efectividad al realizar barridos del factor de textura, tanto en células como en obleas, en pocos segundos.

Concluyendo, las dos ventajas principales con respecto a los sistemas ópticos ya existentes son:

- a) El prototipo aquí presentado es capaz de dar un valor cuantitativo de la calidad de la textura, independientemente de otras influencias como capas anti-reflectantes.
- b) Tras realizar varios prototipos, se está en disposición de asegurar que los costes de fabricación de este prototipo son muy inferiores a aquellos que requieren de espectrofotómetros y esferas integradoras, debido, principalmente al bajo coste del láser a utilizar y de los fotodiodos en comparación con los elevados importes de espectrofotómetros y esferas integradoras. Además, el prototipo aquí presentado, permite una automatización mucho más sencilla, ya que el láser utilizado para escanear la superficie admite divisiones de haz y reflexiones realizados con elementos muy sencillos, tales como espejos giratorios o dispositivos divisores de haz (*beam splitter*).

Capítulo 5

5. RESUMEN Y APORTACIONES

Los resultados obtenidos en los tres temas principales abordados en esta tesis se resumen a continuación:

Capítulo 2. Estudio de la resistencia paralelo (R_p) y su determinación en células y módulos.

Se ha descrito un método sencillo de medida de la R_p de módulos en condiciones de oscuridad y polarización inversa (sección 2.4.2.2. Determinación de la R_p del módulo en oscuridad y polarización inversa). Si bien el fundamento del método no es en sí mismo novedoso, ya que ha sido utilizado con anterioridad para la determinación de R_p en células solares, nunca fue aplicado en líneas de fabricación de módulos fotovoltaicos. Atendiendo a esta carencia, este método ha sido estudiado y desarrollado para su aplicación a la industria, resultando en la integración del mismo en una máquina de medida de módulos por electroluminiscencia, fabricada por Mondragon Assembly (ver *Figura 5-1*), en la que se puede realizar, en el mismo puesto, la medida de electroluminiscencia (EL) del módulo, la medida de R_s del módulo y la medida de R_p del módulo.



Figura 5-1. Máquina de control por electroluminiscencia (EL) y medida de la resistencia serie y paralelo del módulo fotovoltaico. Fabricada por Mondragon Assembly, implementa el método descrito en la sección 2.4.2.2. y que ha sido desarrollada en colaboración con el autor.

Tras realizar este estudio, se determina que, para módulos con R_p baja (por debajo de 3000Ω), este método da un valor de R_p dependiente del rango de voltaje en inversa seleccionado para su cálculo. Además, se ha comprobado que este método ofrece valores mucho más aproximados al valor real que los aportados por los equipos de medida de curvas I-V comerciales, que miden en polarización directa y en iluminación.

Por otro lado, se ha logrado medir correctamente la resistencia paralelo de los módulos fotovoltaicos mediante la utilización de otro método innovador, desarrollado en el marco de esta tesis, al que se ha denominado método de la resistencia externa (sección 2.4.2.3, Propuesta de método de medida de R_p en módulos). Este ha demostrado ser más preciso que el mencionado anteriormente, dando valores de R_p menos dispersos en función de los rangos de voltaje de la curva I-V elegidos para calcular la R_p . Esto es debido, principalmente, a que no requiere de ningún proceso de ajuste de la curva para la obtención de la R_p .

También se ha determinado la R_p de las células de dos módulos muestra con distinta R_p (MA y MB) ajustando, a un polinomio de orden dos, la curva en inversa y en oscuridad que resulta de tapar la célula en cuestión y medir la curva I-V en iluminación de todo el módulo (sección 2.4.3.2). Posteriormente, aplicando la teoría de asociación en serie (sección 2.4.3.1), se obtiene una R_p de módulo (sección 2.4.3.3) muy similar a la obtenida por el método de resistencia externa, demostrando así su validez.

Por último, se han medido las curvas I-V de ambos módulos (MA y MB) a distintas irradiancias y se ha simulado la producción anual de energía en dos localizaciones geográficas con bajos niveles de irradiación, demostrando que un módulo con una R_p alta (como el módulo MA), puede dar hasta un 2,19% más de energía al año que un módulo con R_p baja (como el módulo MB). Así queda patente la importancia de una correcta determinación de la R_p .

Los resultados de este estudio se han publicado en el siguiente artículo:

- *Artículo. E. Forniés, J. L. Balenzategui, M. A. Alonso-García, J. P. Silva. "Method for module R_{sh} determination and its comparison with standard methods" Solar Energy 109, 2014, 189-199.*

Capítulo 3. Estudio de la influencia de la dispersión en células solares sobre la pérdida relativa de potencia de módulos fotovoltaicos.

En este capítulo, la contribución de esta tesis ha sido la de la generación de una ecuación (3.5) capaz de medir la pérdida de potencia relativa utilizando los parámetros estadísticos con lo que normalmente cuenta un fabricante de módulos. Su aplicación a la industria es, por tanto, inmediata. Por otro lado se ha demostrado la validez de dicha fórmula, desde una aproximación estadística, comparándola con la ecuación de Bucciarelli (sección 3.4).

Por último, se ha llegado a una relación empírica que relaciona la dispersión (desviación estándar) de la corriente en el punto de máxima potencia, I_{mp} , de las células fotovoltaicas, con la pérdida de potencia relativa de los módulos que pueden ser fabricados con dichas células. Este resultado es también muy importante para la industria, de manera que le ayuda a estimar la pérdida de potencia (y por tanto de beneficios) que va a obtener un determinado fabricante en función de la desviación estándar de la I_{mp} de las células que ha comprado.

Todos los resultados experimentales se han obtenido mediante la utilización de un gran número de muestras, lo que aporta al estudio un soporte estadístico muy valioso.

Parte del estudio presentado en este capítulo ha sido publicado en el siguiente artículo:

- *Artículo. E. Forniés, F. Naranjo, M. Mazo, F. Ruiz. The influence of mismatch of solar cells on relative power loss of photovoltaic modules. Solar Energy 97, 2013, 39-47.*

Capítulo 4. Estudio de la calidad de la textura de células monocristalinas y su caracterización

En este capítulo se ha realizado la caracterización de los procesos industriales de texturizado de obleas de silicio monocristalino. La calidad del texturizado superficial de las obleas ha sido caracterizada, en distintos momentos del proceso, a través de microscopía y espectroscopia. Para poder alterar los parámetros de proceso, tales como la calidad de la oblea y el tiempo, estos procesos industriales han sido replicados en el laboratorio. Debido a las dificultades encontradas a la hora de caracterizar la textura de las obleas, se ha desarrollado con éxito un método y dispositivo para la medida cualitativa y cuantitativa de la textura de células de silicio monocristalino. El método desarrollado permite llevar a cabo la medida del texturizado, realizando un mapeo de toda la superficie de la oblea, dando, por tanto, información de la homogeneidad del proceso.

La bondad del método propuesto se ha comprobado realizando un prototipo de sistema de caracterización basado en elementos convencionales, obteniéndose resultados satisfactorios en cuanto a su funcionamiento y capacidad para medir el grado de textura de las obleas.

La aportación de esta investigación está refrendada con dos patentes, un artículo en revista de alto impacto y un congreso internacional:

- Patente. WO2005008175 A1, 2005. "Método óptico y dispositivo para la cuantificación de la textura en células fotovoltaicas". J. M. Albella, E. Forniés, C. Zaldo.
- Patente. US20060268283 A1, 2006 "Optical method and device for texture quantification of photovoltaic cells"
- Poster en Conferencia. E. Forniés, C. Zaldo, J. M. Albella. Control of random texture of monocrystalline silicon cells by angle-resolved optical reflectance. 2004. International Conference on Physics, Chemistry and Engineering of Solar Cells, Badajoz Spain.
- Artículo. E. Forniés, C. Zaldo, J. M. Albella. Control of random texture of monocrystalline silicon cells by angle-resolved optical reflectance. Solar Energy Materials & Solar Cells 87, 2005, 583-593.

6. ANEXO A

CÁLCULO DE ERRORES

Una parte importante del estudio llevado a cabo es la determinación y acotación de errores, lo que nos permitirá conocer el margen de validez de los resultados obtenidos. En este anexo se muestra un análisis de los errores involucrados en las medidas realizadas.

6.1. - Descripción del equipo de medida de células y módulos

FV

Un esquema del dispositivo empleado para la medida de células y módulos a lo largo de este trabajo se muestra en la *Figura 6-1*.

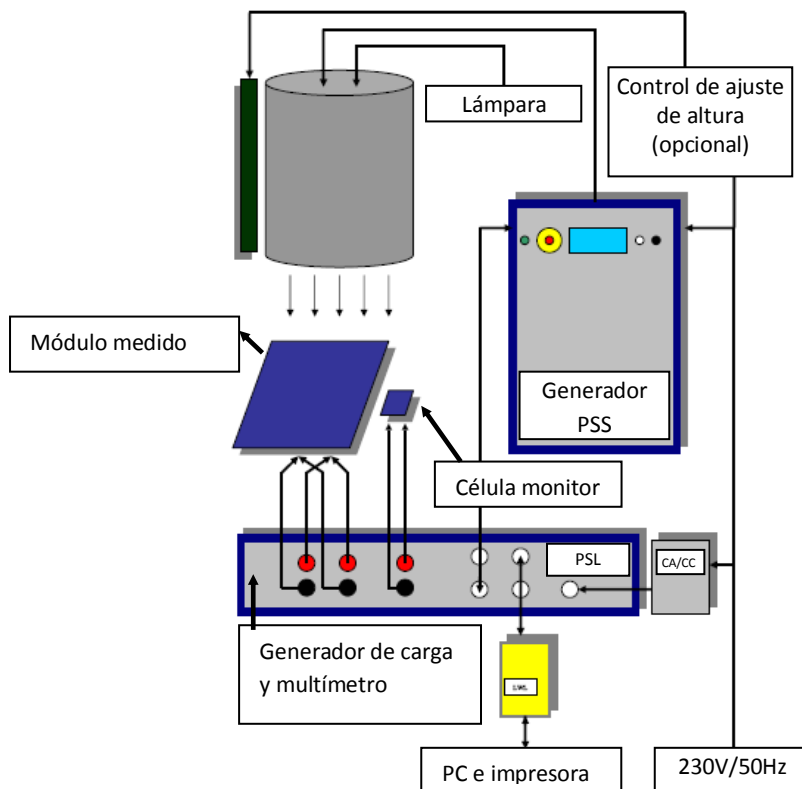


Figura 6-1. Esquema del simulador solar o "flash tester" Berger. El esquema es válido también para el "cell tester" sustituyendo el "módulo medido" por "célula medida".

El sistema consta de las siguientes partes:

- *Generador Pulsed Solar Simulator (PSS)*: Esta es la fuente de alimentación de la lámpara, confiriéndole la energía necesaria para la generación de una irradiancia de 1000 W/m^2 .
- Lámpara: Consta de una lámpara de Xenon ubicada en un tubo de forma cilíndrica alineado con la posición de medida del módulo. Esta lámpara es capaz de producir los 1000 W/m^2 con el espectro, homogeneidad y repetitividad necesarios y especificados en la norma IEC 60904-9:2007.
- Célula monitor: Célula calibrada en un laboratorio que es utilizada para medir la irradiancia que le llega al módulo a medir. Esta célula se encuentra en el mismo plano del módulo (o célula) medido, de manera que mide en tiempo real la irradiancia recibida por dicho módulo.
- Generador de carga y multímetro (*PSL*): Esta unidad cambia su resistencia interna para poder generar las parejas de datos (I,V), que a la postre forman la curva I-V. La medida de la corriente y voltaje es realizada por esta misma unidad.
- Para registrar la temperatura del módulo, necesaria para obtener la potencia y resto de parámetros eléctricos en condiciones estándar de medida (CEM), existe un detector de infrarrojos en la parte posterior del módulo medido que nos da el dato de temperatura del módulo.

Los dispositivos de medida son:

- a) En primer lugar el **multímetro**, que mide el voltaje y la corriente del dispositivo de fotovoltaico. Éste ha sido calibrado y presenta un determinado error sistemático.
- b) La célula **fotovoltaica** llamada célula monitor, que se encuentra al lado del módulo o célula que se quiere medir. Esta célula da información de la cantidad de luz que llega en el momento de la medida, lo que nos sirve para referir la potencia y la corriente medidas por el multímetro, a las condiciones estándar

de medida (1000 W/m^2). Esa célula monitor debe ser calibrada con un módulo o célula de referencia.

- c) El detector de infrarrojos para la determinación de la temperatura del módulo. Se calibra mediante el uso de una sonda de temperatura ya calibrada tocando la misma superficie medida por el detector de infrarrojos. Su incertidumbre es de $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

6.2.- Errores de los dispositivos de medida

En función de los dispositivos de medida, las distintas fuentes de error son las siguientes:

- 1) **Error accidental** (aleatorio) del multímetro que mide el voltaje y la corriente del dispositivo fotovoltaico. Este viene determinado por métodos estadísticos utilizando la desviación estándar:

$$\sigma = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{I} - I_i)^2}{n \cdot (n - 1)} \right]^{1/2} \quad (6.1)$$

Imponiendo un nivel de confianza del 99,7% el error vendrá determinado por el siguiente intervalo:

$$\Delta I = \pm 3\sigma$$

Para determinar el error del “flash tester”, se han realizado pruebas de repetitividad sobre un mismo módulo medido 50 veces, en la posición de medida.

Sin embargo, en el caso del medidor de células o “cell ester” es muy crítico el posicionamiento de la célula a testear en la estación de medida. Los pines que contactan el frontal de la célula hacen sombra sobre el bus de la misma, de

manera que un leve desalineamiento puede provocar un mal contacto de los pines sobre el bus o que la sombra incida sobre partes activas de la célula.

En este estudio el “cell tester” está integrado en una máquina denominada clasificador o “sorter” la cuál posiciona la célula en una cinta que a su vez se mueve desplazando la célula hasta la posición de medida (ver *Figura 6-2*). El robot y el movimiento de la cinta son los responsables del posible desalineamiento de los buses de la célula con los pines que deberán bajar para contactar los mismos. Esto aumenta considerablemente el error y es la situación normal de operación de cualquier fábrica en general y de este experimento en particular.

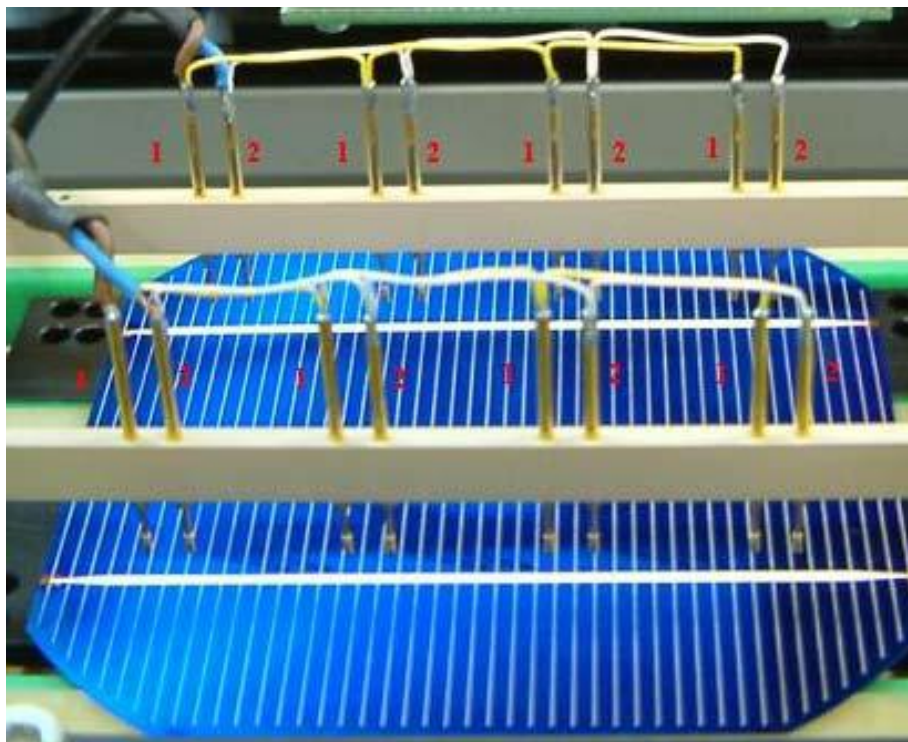


Figura 6-2. Fotografía de la zona de medida del “cell tester”. Los pines inciden por la parte superior de la célula alineados con los colectores o “buses” de ésta. Un mismo juego de pines incide por la parte inferior de la célula y también alineados con los buses de la misma. El juego de pines mide tanto corriente como voltaje.

En el caso del “flash tester” no hay ninguna sombra incidente sobre el módulo, ya que los contactos se hacen empleando los cables positivo y negativo del posterior del módulo.

Para determinar el error accidental de la medida del “*cell tester*”, siendo la célula posicionada por el robot y la cinta transportadora, se tomó una célula calibrada y se colocó en la zona de carga del clasificador o “*sorter*”, de manera que el robot coge la célula y la sitúa en la cinta transportadora que la mueve hasta la posición de medida (ver *Figura 6-2*), en ese momento bajan los pines frontales y suben los posteriores y es entonces cuando, en presencia de un pulso (*flash*) de luz, se hace la medida. Este procedimiento se repitió 50 veces con la misma célula.

Los errores aleatorios, tanto del “*cell tester*” como del “*flash tester*” se recogen en la siguiente tabla:

Error aleatorio	Corriente	Voltaje	Potencia
<i>Cell tester</i>	0,2%	0,2%	0,2%
<i>Flash tester</i>	0,1%	0,07%	0,09%

- 2) **Error sistemático.** En este caso, para los dos sistemas de medida, *cell tester* y *flash tester*, los equipos tienen dos errores sistemáticos distintos; a) error sistemático de calibración del multímetro, el cual está por debajo del 0,1%, tanto en voltaje como en corriente y b) error sistemático de calibración de la célula monitor. Por ser este error más grande que el de calibración del multímetro, sólo consideraremos este error.

Todas las medidas de P_m , I_{mp} e I_{sc} son referidas a 1000 W/m^2 de luz. Para ello una célula monitor mide la cantidad de luz que llega al módulo o célula a medir. En función de la irradiancia medida, la corriente y por lo tanto la potencia son transformadas para ser referidas a dicha irradiancia.

Para calibrar dicha célula monitor se cuenta con un módulo de referencia, en el caso del “*flash tester*”, o una célula de referencia, en el caso del “*cell tester*”. La incertidumbre de ambos es la siguiente:

Incertidumbre	Corriente	Voltaje	Potencia
Célula de calibración	1,6%	1,0%	2,0%
Módulo de calibración	1,8%	0,3%	2,2%

Este error es con diferencia el mayor de todos. Esto es, la precisión de los equipos de medida es elevada. Sin embargo la calibración de la célula monitor tiene un error sistemático muy alto, con lo que la exactitud de los equipos no los es tanto. Cuando la célula monitor es calibrada con una célula de referencia, se asume el error mencionado anteriormente. Así, cuando medimos por ejemplo un módulo y obtenemos 190 W, el valor real se encontrará en el siguiente intervalo:

$$186,2 \text{ W} \leq P_{mod} \leq 193,8 \text{ W}$$

Debido al carácter sistemático de dicho error, cada medida realizada estará desplaza respecto del valor real siempre la misma cantidad, y esta distancia siempre será por exceso o siempre por defecto. Esa es la principal diferencia con respecto a un error aleatorio. Como se deduce de nuestro estudio, nuestro interés es conocer el aumento relativo del RPL con respecto a la desviación estándar de distintos parámetros elegidos, principalmente I_{sc} y I_{mp} . Como es sabido, el error sistemático no influye en la dispersión de las medidas realizadas y por lo tanto no influye en su desviación estándar, por tanto para evitar malas interpretaciones no se utilizará dicho error en las tablas de células.

Por tanto, para el caso del cálculo de error de $\overline{RPL_E} = \frac{N \cdot P_{max} - P_{mod}}{N \cdot P_{max}}$ se obtiene, mediante diferenciación directa, que el error de $\overline{RPL_E}$ es:

$$\begin{aligned} \Delta \overline{RPL_E} &= \left| \frac{\partial \overline{RPL_E}}{\partial P_{max}} \right| \cdot \Delta P_{max} + \left| \frac{\partial \overline{RPL_E}}{\partial P_{mod}} \right| \cdot \Delta P_{mod} = \\ &= \frac{P_{mod}}{N \cdot P_{max}^2} \Delta P_{max} + \frac{\Delta P_{mod}}{N \cdot P_{max}} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Utilizando, como se ha mencionado anteriormente, los errores aleatorios de las variables y no los errores sistemáticos.

Sin embargo, el error sistemático sigue siendo un error real, que efectivamente influye para el cálculo del RPL.

En la ecuación (3.5) se define el RPL como:

$$\overline{RPL_E} = \frac{N \cdot P_{max} - P_{mod}}{N \cdot P_{max}}$$

Las magnitudes P_{max} (potencia promedio de una agrupación de células medida en el “*Cell Tester*”) y P_{mod} (potencia promedio de módulos fabricados con células de una determinada agrupación medidos en el “*flash tester*”) son completamente independientes y poseen calibraciones (errores sistemáticos) independientes que influirán de manera apreciable en $\overline{RPL_E}$. Así, el valor absoluto de $\overline{RPL_E}$ se ve fuertemente influido por la calibración de la célula monitor del *Cell Tester* y la célula monitor del *Flash Tester*. Sin embargo, esto no ocurre con la variación de $\overline{RPL_E}$ entre agrupaciones, ya que esta se calcula con la misma calibración que influye de la misma manera a todas las agrupaciones para los rangos de RPL estudiados.

6.3.- Resultados

Como ejemplo se presenta el caso del subgrupo $\delta 1457$, cuyos resultados se muestran en la tabla de errores *Tabla 6-2*. En esta tabla se resumen, tanto el error sistemático de calibración como los errores relacionados a la dispersión de la agrupación medida. En negrita se muestran los errores utilizados para calcular el error del RPL.

Célula (errores de los aparatos de medida)	$\alpha 1457A$	$\alpha 1457B$	$\alpha 1457C$
P_{max} [W]	2,309	2,275	2,247
Error sistemático de calibración de célula monitor [W]	0,05	0,05	0,05
Error aleatorio (99,7% confianza) [W]	0,005	0,005	0,004
$\overline{I_{mp}}$ [A]	4,508	4,418	4,362
Error sistemático de calibración de la célula monitor [A]	0,07	0,07	0,07
Error aleatorio (99,7% confianza) [A]	0,01	0,01	0,01
$\overline{I_{sc}}$ [A]	4,995	4,906	4,829
Error sistemático de calibración de la célula monitor [A]	0,08	0,08	0,08
Error aleatorio (99,7% confianza) [A]	0,01	0,01	0,01

Tabla 6-1. Tabla de errores correspondiente a la medida de células

Módulo	$\alpha 1457A$	$\alpha 1457B$	$\alpha 1457C$
P_{mod} [W]	163,1	162,6	161,6
Error sistemático de calibración de célula monitor [W]	3	3	3
Error aleatorio (99,7% confianza) [W]	0,2	0,2	0,2
Error de $\overline{RPL_E}$ % utilizando la diferenciación directa	0,3	0,3	0,3

Tabla 6-2. Tabla de errores correspondiente a la medida de células

Como se ha comentado, para el cálculo del error del RPL no se han tenido en cuenta los errores sistemáticos. Así al representar el RPL en función de la desviación estándar, las barras de error serán las correspondientes a los mayores errores aleatorios observados. Sin embargo, a la hora de dar un error a la pendiente de la recta resultante de representar el RPL frente a la desviación estándar (*Figura 3-17 y Figura 3-21*), sí se han utilizado los errores sistemáticos. Para ver cómo varía el RPL, se estudian los dos casos más extremos dependiendo del error sistemático de calibración, estos son:

$$\begin{aligned}\overline{RPL}_{E-} &= \frac{N \cdot (P_{max} - \Delta P_{max,cal}) - (P_{mod} + \Delta P_{mod,cal})}{N \cdot (P_{max} - \Delta P_{max,cal})} = \\ &= 1 - \frac{P_{mod} + \Delta P_{mod,cal}}{N \cdot (P_{max} - \Delta P_{max,cal})}\end{aligned}\tag{6.3}$$

$$\begin{aligned}\overline{RPL}_{E+} &= \frac{N \cdot (P_{max} + \Delta P_{max,cal}) - (P_{mod} - \Delta P_{mod,cal})}{N \cdot (P_{max} + \Delta P_{max,cal})} = \\ &= 1 - \frac{P_{mod} - \Delta P_{mod,cal}}{N \cdot (P_{max} + \Delta P_{max,cal})}\end{aligned}\tag{6.4}$$

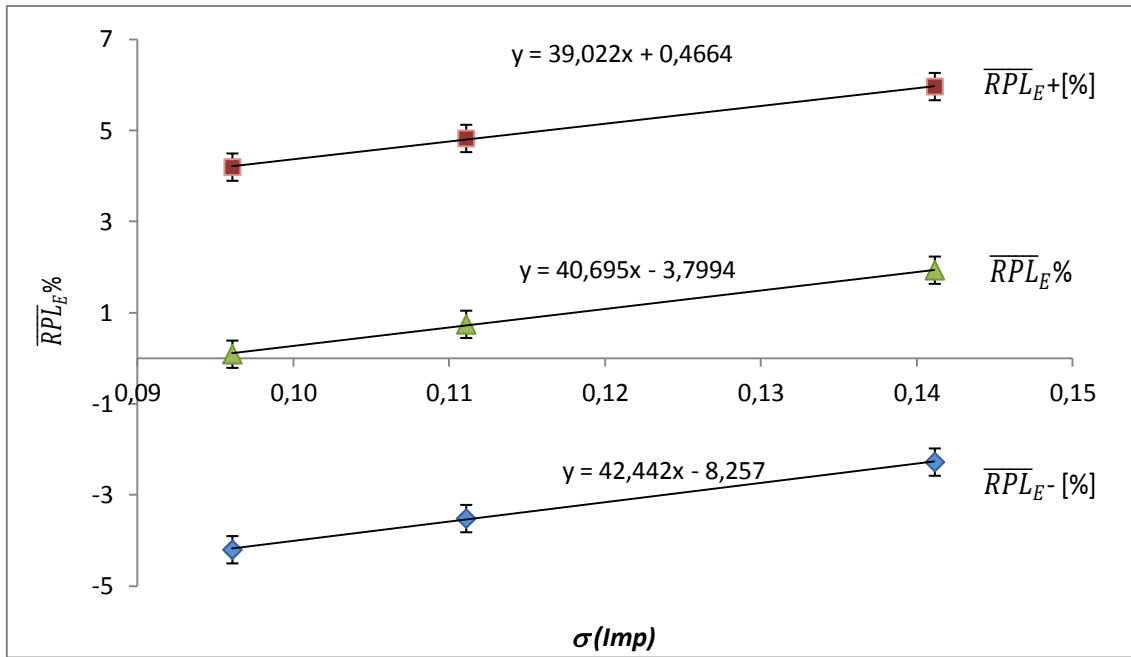


Figura 6-3. $\overline{RPL}_E\%$ considerando los errores de calibración

Para obtener el error de la pendiente tomaremos los valores de PRL+ y RPL- como los valores extremos de intervalo de error elegido. Así, la pendiente de la recta, y por lo tanto la relación perseguida entre RPL y desviación estándar, así como su error queda expresado como:

$$\frac{\Delta \overline{RPL}_E\%}{\Delta \sigma(I_{mp})} = (41 \pm 2) \quad \%/A$$

7. ANEXO B

PROCESOS DE FABRICACIÓN DE LAS CÉLULAS SOLARES UTILIZADAS

En este trabajo se han utilizado células convencionales comerciales multicristalinas y monocristalinas para la fabricación de módulos. En los siguientes apartados se describen los distintos procesos de fabricación por los que dichas células han pasado.

MONOCRISTALINAS

1) Limpieza de la oblea:

Las obleas son introducidas en baños de NaOH y baños posteriores de HF para una limpieza previa.

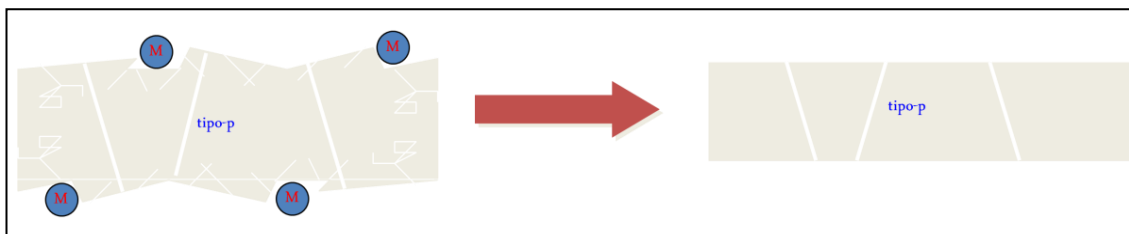


Figura 7-1. Limpieza química de la oblea con baños cáusticos y ácidos

2) Texturizado de la oblea:

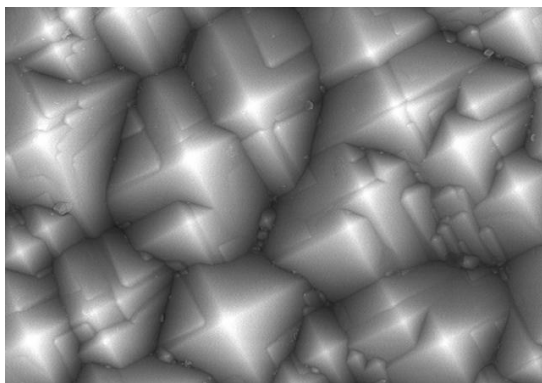


Figura 7-2. Textura en forma de pirámides

Las obleas después de ser limpiadas pasan por unos baños de NaOH con alcohol isopropílico a una temperatura próxima a las 82°C. Esto provoca un ataque preferencial de los planos de menor densidad atómica de la estructura de diamante de la red

cristalina del silicio. Después de unos 25 minutos queda una textura en forma de pirámides como muestra la fotografía izquierda.

3) Dopado y difusión de fósforo:

Las obleas son introducidas en un horno de cinta a unos 900 °C en una atmósfera de ácido fosfórico. Una película de PSG ($\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5$) queda depositada sobre la superficie. Debido a la temperatura el P es difundido hacia el interior de la célula hasta una profundidad de unos 400 nm. La resistencia de la película es de alrededor de 55 Ohm/sqr.

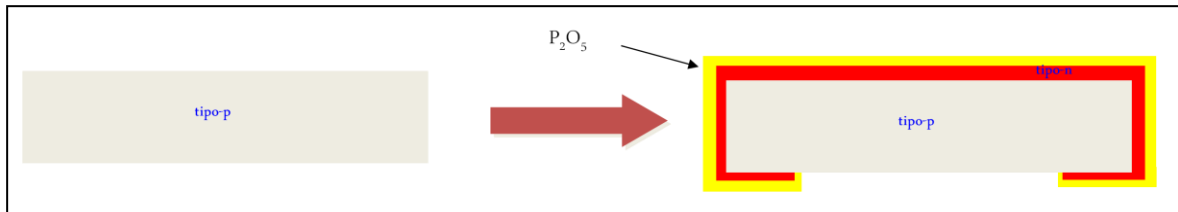


Figura 7-3. Vista de sección de una oblea antes y después de la difusión de fósforo

4) Con un corte por láser se realiza el aislamiento eléctrico de los bordes de la célula:

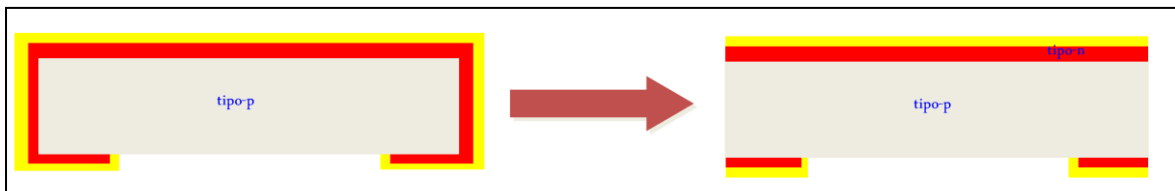


Figura 7-4. Vista de sección de una oblea mono antes y después del aislamiento de los bordes

5) Los restos de PSG son limpiados en una baños de ácido fluorhídrico

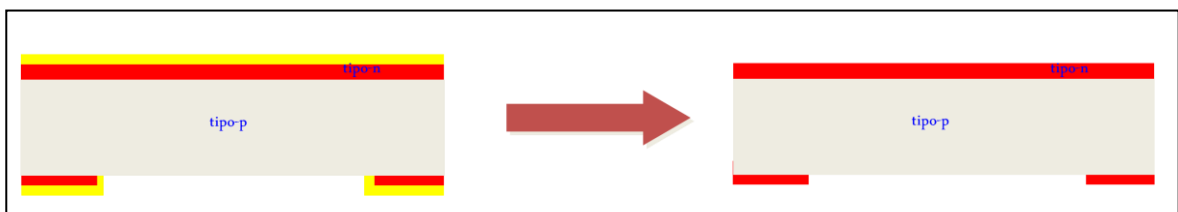


Figura 7-5. Vista de sección de una oblea antes y después del aislamiento de los bordes

- 6) Deposición de la capa anti-reflectante (ARC) de Si_3N_4 en hornos de PECVD. Se deposita una capa de nitruro de unos 80nm utilizando silano y nitrógeno como gases precursores. Se consigue además una pasivación de la superficie:

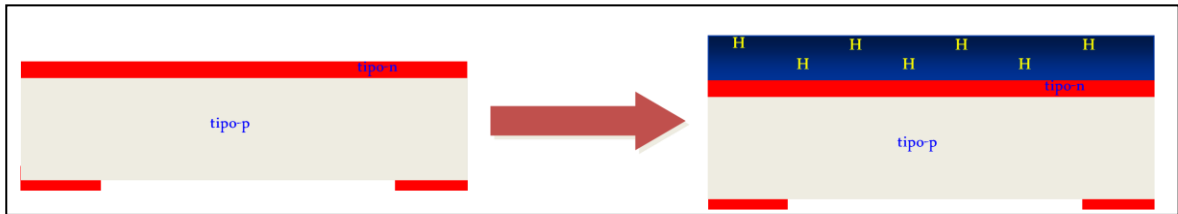
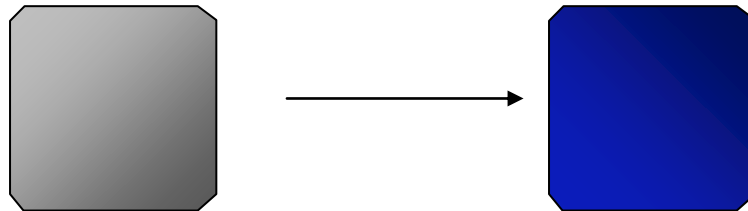


Figura 7-6. Vista de sección de una oblea antes y después de la deposición de la capa anti-reflectante



- 7) Impresión de los contactos de plata frontales (buses y fingers) por Screen Print.

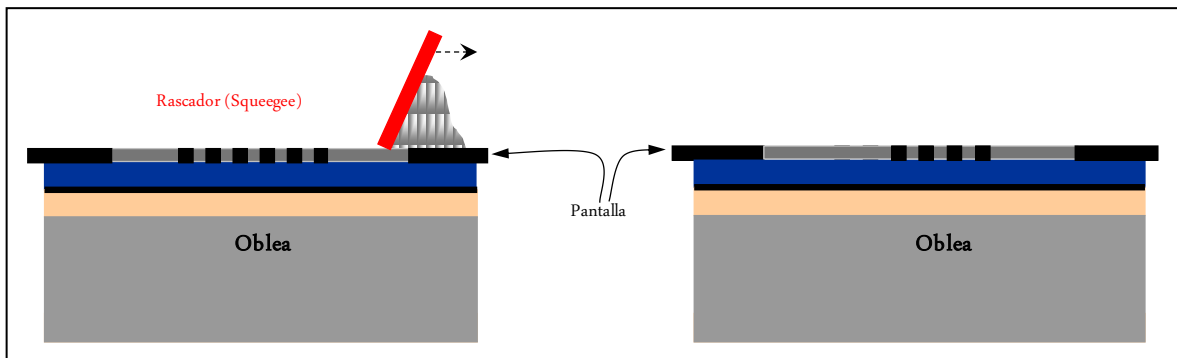


Figura 7-7. Vista de sección de una célula antes y después de la deposición de los contactos frontales de plata



8) Impresión de los contactos posteriores por *screen print* (buses y BSF de Al):

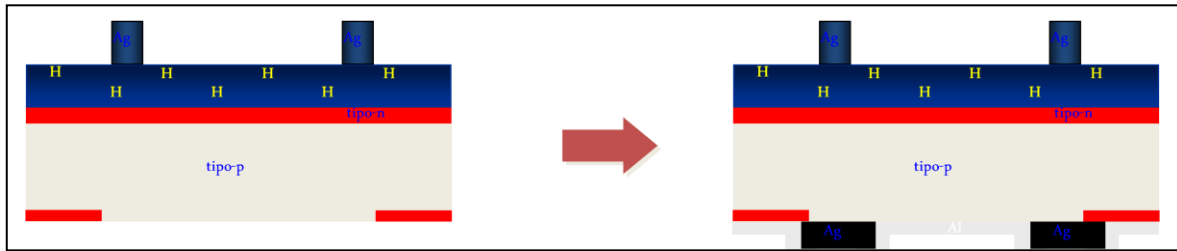


Figura 7-8. Vista de sección de una oblea antes y después de la deposición de los contactos posteriores de plata y el BSF de Al

9) Las células pasan a un horno de cinta donde se produce el *co-firing*, es decir la penetración de los contactos en el silicio para establecer el contacto óhmico:

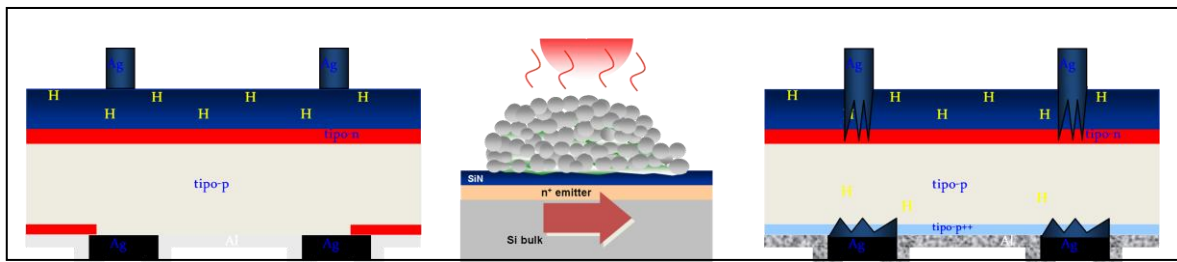


Figura 7-9. Vista de sección de una célula antes y después del proceso de co-firing

MULTICRISTALINAS.

1) Limpieza de la oblea:

Las obleas son introducidas en baños de NaOH y baños posteriores de HF para una limpieza previa.

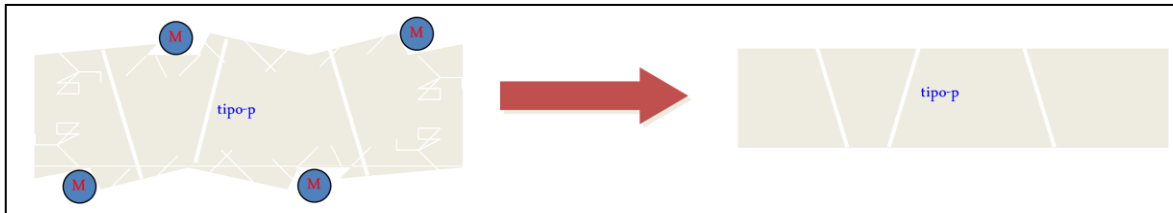


Figura 7-10. Vista de sección de una oblea antes y después del texturizado en baños de NaOH

A parte de la limpieza la oblea queda con una textura en forma de terrazas (Figura), que le confiere a la oblea una apariencia macroscópica de mosaico (imagen derecha):

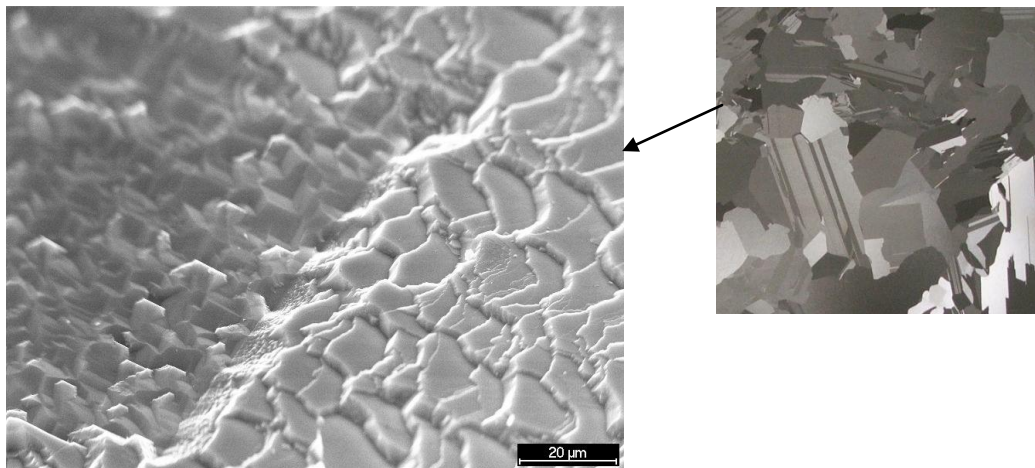


Figura 7-11. Imagen de SEM de una oblea multi texturizada en una junta de grano. Fotografía de una oblea texturizada con NaOH.

2) Dopado y difusión de fósforo:

Las obleas son introducidas en un horno de cinta a unos 900 °C en una atmósfera de ácido fosfórico. Una película de PSG ($\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5$) queda depositada sobre la superficie. Debido a la temperatura el P es difundido hacia el interior de la célula hasta una profundidad de unos 400 nm. La resistencia de la película es de alrededor de 55 Ω/sqr .

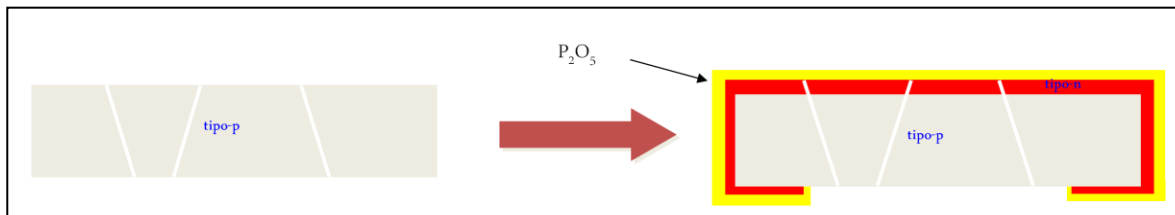


Figura 7-12. Vista de sección de una oblea antes y después de la deposición de PSG

3) Con una ataque de plasma en freón y nitrógeno se realiza el aislamiento eléctrico del contorno de la oblea:

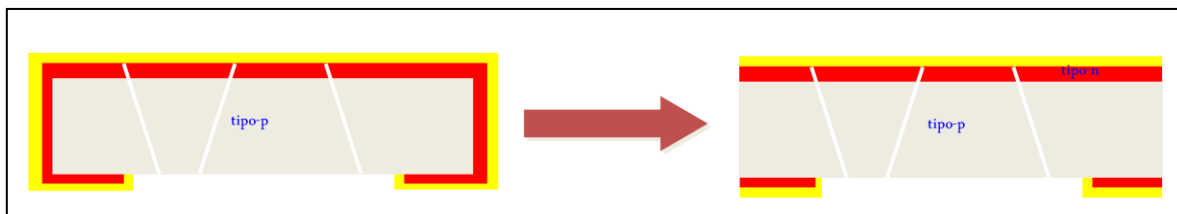


Figura 7-13. Vista de sección de una oblea multicristalina antes y después del aislamiento de los bordes

4) Los restos de PSG son limpiados en una baños de fluorhídrico

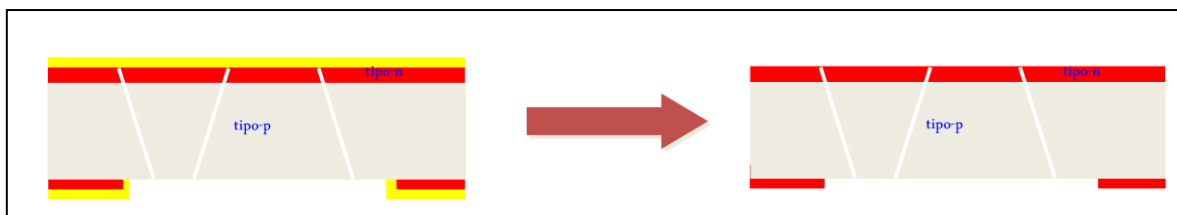


Figura 7-14. Vista de sección de una oblea antes y después del aislamiento de los bordes

- 5) Deposición de la capa anti-reflectante (ARC) de Si_3N_4 en hornos de PECVD. Se deposita una capa de nitruro de unos 80nm utilizando silano y nitrógeno como gases precursores. Se consigue además una pasivación de la superficie:

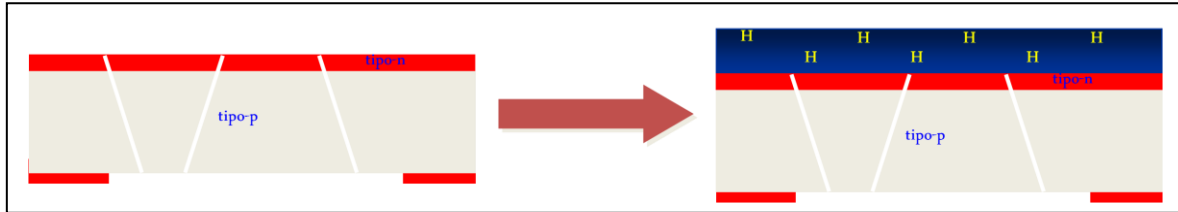
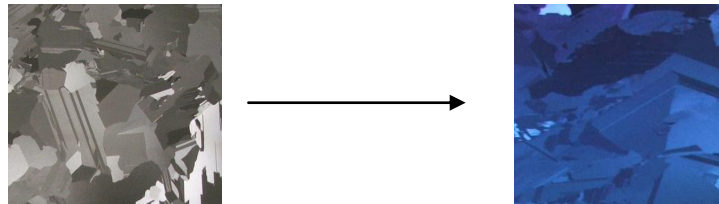


Figura 7-15. Vista de sección de una oblea antes y después de la deposición de la capa antirreflexiva



- 6) Impresión de los contactos de plata frontales (buses y fingers) por Screen Print.

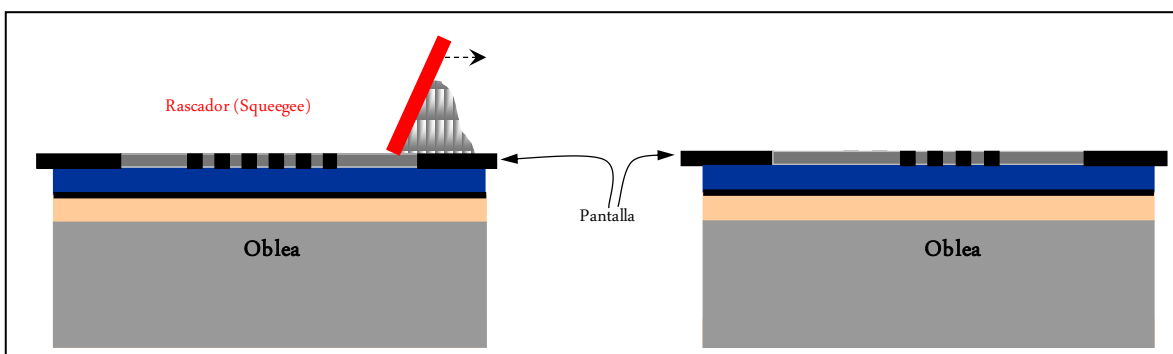


Figura 7-16. Vista de sección de una célula antes y después de la deposición de los contactos frontales de plata

7) Impresión de los contactos posteriores por “screen print” (buses y BSF de Al):

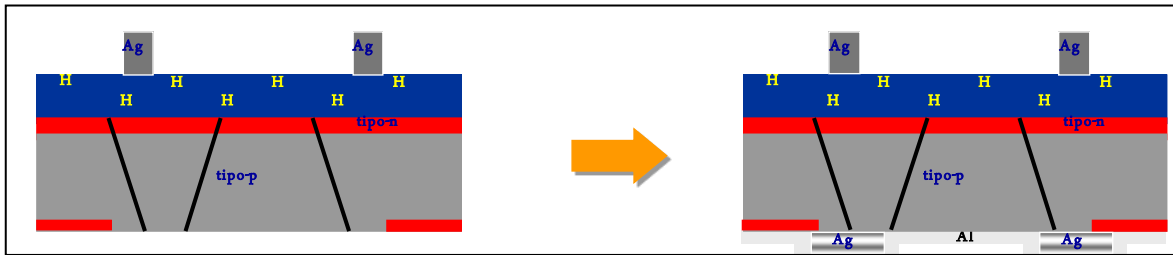


Figura 7-17. Vista de sección de una oblea antes y después de la deposición de los contactos posteriores de plata y el BSF de Al

8) Las células pasan a un horno de cinta donde se produce el co-firing, es decir la penetración de los contactos en el silicio para establecer el contacto óhmico:

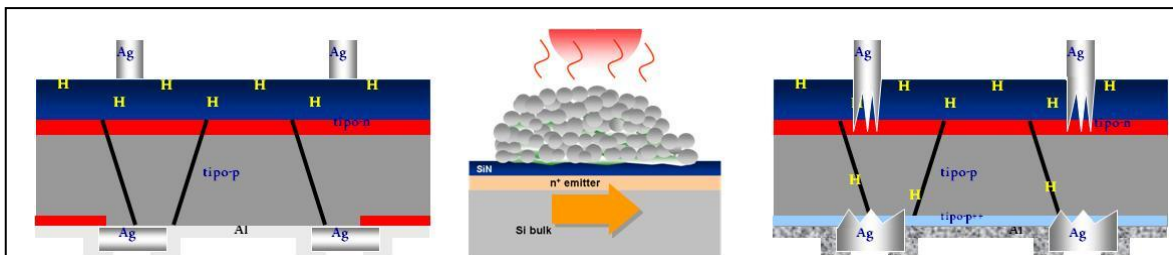


Figura 7-18. Vista de sección de una célula antes y después del proceso de “co-firing”

8. ANEXO C

PROCESOS DE FABRICACIÓN DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.

Los módulos fabricados han seguido el proceso estándar de fabricación de módulos de la empresa AURINKA PHOTOVOLTAIC GROUP. Este proceso se describe a continuación:

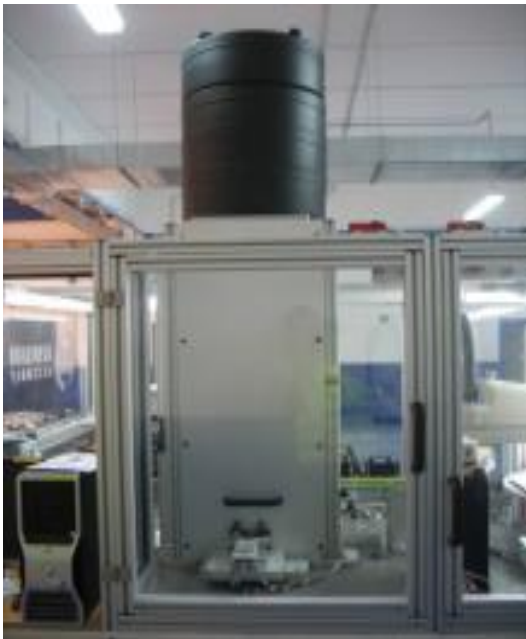


Figura 8-1. Columna de medida del “Cell tester”

En primer lugar se realiza la medida y clasificación de las células. Para ello se ha utilizado un *cell tester* Berger, tipo AAA (*Figura 8-1*). Las células son colocadas en la columna de medida, en la posición de medida y un juego de pines entra en contacto con los buses frontal y posterior de las células. Entonces un pulso de luz es emitido desde una lámpara de Xenon situado a 2m de la célula. El pulso de luz posee una densidad de potencia de 1000 W/m^2 aproximadamente. Los 100 puntos de la curva en directa es recogida en 5,5 milisegundos.

Las fluctuaciones en potencia del pulso de luz son corregidas por el software utilizando la medida de una célula monitor situada en el mismo plano de medida de la célula muestra. La célula monitor ha sido calibrada utilizando una célula de referencia.

Al mismo tiempo que las células son medidas, éstas son clasificadas en cuatro grupos distintos. Tres de ellos corresponden a tres rangos de corriente distintos. El cuarto

corresponde a células rechazadas porque alguno de sus parámetros eléctricos está fuera de un valor umbral definido previamente.

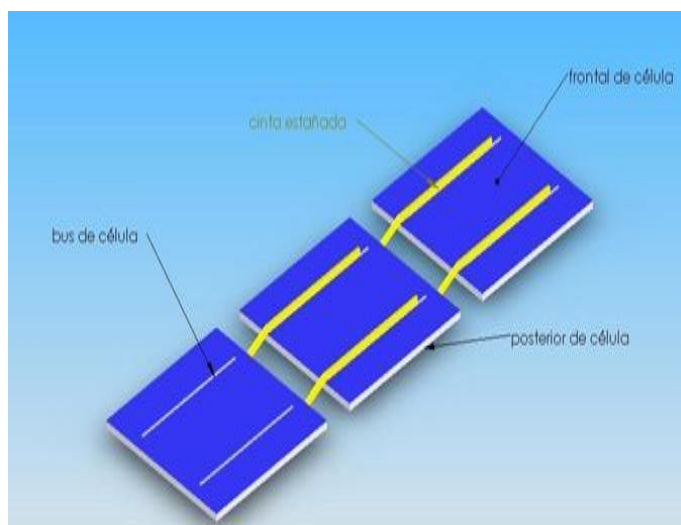


Figura 8-2. Esquema de serie de células (string)

La corriente utilizada para la clasificación puede ser I_{sc} o I_{mp} según el caso. Las células han sido introducidas por agrupaciones en una máquina de encintado “*taber-stringer*”. Las agrupaciones no se han mezclado entre ellas, de manera que los módulos han sido fabricados con células procedentes de una misma agrupación. Esta máquina suelda las células entre sí, conectando el positivo de una célula con el negativo de la célula adyacente (ver Figura 8-2) hasta fabricar una tira de células (en este caso de 12 células). Se suelda simultáneamente las cintas de los buses frontales y las de los buses posteriores mediante dos lámparas de infrarrojos.

El material usado para la soldadura es una cinta de cobre estañada de 2x0,13 mm. El recubrimiento de estaño es en realidad una aleación de estaño, plomo y plata (Sn60%-Pb38%-Ag2%). Una vez fabricada la tira de células, esta se coloca sobre el vidrio sobre el que ya se ha depositado una lámina de EVA (Etil-Vinil Acetato). Una vez que se han depositado 6 tiras de células, estas son inter-conexionadas entre sí mediante otra cinta de cobre estañado, llamada bus-bar, y de mayores dimensiones que la anterior (5x0,3 mm). Se conecta el positivo de una tira con el negativo de la tira adyacente. De esta manera se consigue conectar en serie todas las células del módulo.

Los parámetros y materiales utilizados para la fabricación de los módulos han sido los mismos para todos los grupos de células.

Posteriormente se deposita otra lámina de EVA con fibra de vidrio en la parte posterior de las células y finalmente una lámina aislante de Tedlar-Poliéster-Tedlar (ver *Figura 9-3*).

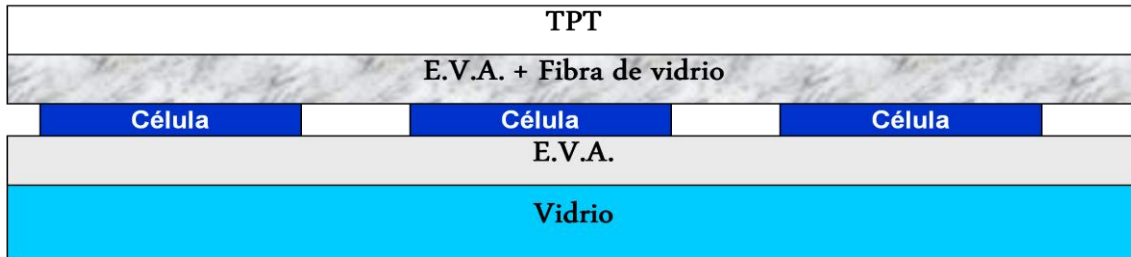


Figura 8-3. Esquema transversal del módulo

Posteriormente a su conformado, los módulos son laminados en vacío y a una temperatura próxima a 150°C . Cuando los laminados salen del laminador, se sueldan las cajas de conexiones a los terminales procedentes de los laminados. En las cajas de conexiones están los diodos de paso.

Después de su laminación los módulos fueron enfriados a 25°C y medidos en el *flash tester*, Berger tipo AAA. Para medir el módulo, este se conecta a una carga que cambiará su resistencia de carga para ir generando la curva I-V. El pulso de luz es generado por una lámpara de Xenon situada a 5m de distancia, enviando al módulo una densidad de potencia de 1000 W/m^2 . Las fluctuaciones en potencia del pulso de luz son corregidas por el software utilizando la medida de una célula monitor situada en el mismo plano de medida del módulo muestra. La célula monitor ha sido calibrada utilizando un módulo de referencia.

Posteriormente los módulos fueron conectados a una fuente de alimentación que los polariza en directa, haciendo pasar corriente por las células. Bajo estas condiciones los módulos son expuestos a una cámara de infrarrojos. De esta manera se pueden detectar roturas, fallos de soldadura, etc. Aquellos módulos con algún defecto fueron excluidos de la prueba.

REFERENCIAS

- [1] M. Simon and E. Meyer, "Detection and analysis of hot-spot formation in solar cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94, pp. 106-113, 2010.
- [2] E. Meyer and E. Dyk, "The effect of reduced shunt resistance and shading on photovoltaic module performance," *31st IEEE*, pp. 1331-1334, 2005.
- [3] M. Swaleh and M. Green, "Effect of shunt resistance and bypass diodes on the shadow tolerance of solar cell modules," *Solar Cells*, 5, pp. 183-198, 1982.
- [4] F. Blake and K. Hanson, "The hot spot failure mode for solar arrays," *4th IECCEC*, pp. 575-581, 1969.
- [5] M. C. Alonso-García, "Caracterización y modelado de asociaciones de dispositivos fotovoltaicos," *Editorial CIEMAT*, 2005.
- [6] M. Danner and K. Bücher, "Reverse characteristics of commercial silicon solar cells- Impact on hot spot temperatures and module integrity," *26th IEEE*, pp. 1137-1140, 1997.
- [7] R. Hartman, J. Prince and J. Lathrop, "Second quadrant effect in silicon solar cells," *Southeastcon'80 Conference and exhibit*, 1980.
- [8] P. Spirito and V. Abergamo, "Reverse bias power dissipation of shadowed or faulty cells in different array configurations," *4th EUPVSEC*, 1982.
- [9] C. Lopez Pineda, "Experimental evaluation of reverse bias stress induced on photovoltaic modules for different configurations," *Solid & Wind technology*, pp. 85-88, 1986.
- [10] J. Bishop, "Microplasma breakdown and hot-spots in silicon solar cells," *Solar Cells*, 26, pp. 335-349, 1989.
- [11] A. Kaminski, J. Jouglar, C. Volle, S. Natalizio, L. Vuillermoz P and A. Laugier, "Non-destructive characterization of defects in devices using infrared thermography," *Microelectronics Journal*, vol. 30, pp. 1137-1140, 1999.
- [12] A. Kaminski, M. Langenkamp and O. Breitenstein, "Shunt detection by infrared thermography and dynamic precision contact thermography," in *EUPVSEC 14th*, Barcelona, 1997.
- [13] A. Kaminski, O. Breitenstein, P. Boyeaux J, P. Rakotoniana and A. Laugier, "Light beam induced current and infrared thermography studies of multicrystalline silicon solar cells," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 16, pp. 9-18, 2004.

- [14] O. Breitenstein, J. Rakotoniaina, M. Al Rifai and M. Werner, "Shunt types in crystalline silicon solar cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 12, pp. 529-538, 2004.
- [15] M. Langenkamp and O. Breitenstein, "Classifications of shunting mechanisms in crystalline silicon solar cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 72, pp. 433-440, 2002.
- [16] W. Herrmann and W. Wiesner, "Operational behaviour of commercial solar cells uinder reverse bias conditions," *2nd WCPEC*, pp. 2357-2359, 1988.
- [17] M. C. Alonso-García, W. Herrmann, W. Boehmer and B. Proisy, "Thermal and electrical effects caused by outdoor hot-spot testing in associations of photovoltaic cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 11, pp. 293-307, 2003.
- [18] W. Herrmann, M. C. Alonso-García, W. Boehmer and K. Wambach, "Effective hot-spot protection of PV modules-characteristics of crystalline silicon cells and consequences for cell production," *17th EUPVSEC*, p. Munich, 2001.
- [19] L. Zhang, X. Xu, Z. Yang, X. Sun, H. Xu, H. Liu and H. Shen, "An efficient method for monitoring the shunts in silicon solar cells during fabrication processes with infrared imaging," *Journal of Semiconductors*, 30, no. 7, 2009.
- [20] O. Breitenstein, K. Iwig and I. Konovalov, "Identification of factors reducing Voc in mc silicon solar cells," in *25th PVSEC*, Washington, D.C., 1996.
- [21] D. L. King, J. Kratochvil, M. Quintana and T. McMahon, "Applications for infrared imaging equipment in photovoltaic cell, module, and system testing," in *Photovoltaic Specialists Conference. 28th IEEE*, Anchorage, 2000.
- [22] R. Lal and R. Sharan, "Shunt resistance and soft reverse characteristics of silicon diffused-junction solar cells," *Solid-State Electronics*, 29, pp. 1015-1023, 1986.
- [23] H. Kressel, "A review of the effect of imperfections on the electrical breakdown of P-N junctions," *RCA Review*, 1967.
- [24] T. McMahon, T. Basso and S. Rummel, "Cell shunt resistance and photovoltaic module performance," *25th IEEE*, pp. 1291-1294, 1996.
- [25] P. Grunow, S. Lust, D. Sauter, C. Hoffmann, C. Beneking, B. Litzenburger and L. Podlowski, "Weak light performance and annual yields of pv modules and systems as a result of the basic parameter set of industrial solar cells," *19th EUPVSEC*, pp. 2190-2193, 2004.
- [26] M. Müller, J. Isenberg, B. Hund, H. Beyer and M. Sedlacek, "Influence of shunt resistance, series resistance and recombination current on weak light performance of industrial silicon solar cells," *25th EUPVSEC*, pp. 2604-2606, 2010.

- [27] M. López, J. Galán, J. Rando, L. López Caballero and L. López, "Influence of resistivity and shunt resistance in PV modules performance," *25th EUPVSEC*, pp. 2676-2677, 2010.
- [28] O. Breitenstein, J. P. Rakotoniaina and M. H. Al Rifai, "Quantitative evaluation of shunts insolar cells by Lock-In Thermography," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 11, pp. 515-526, 2003.
- [29] Y. Chen, X. Wang, D. Li, R. Hong and H. Shen, "Parameters extraction from commercial solar cells I-V characteristics and shunt analysis," *Applied Energy*, 88, pp. 2239-2244, 2011.
- [30] Pryanka, M. Lal and S. Singh, "A new method of determination of series and shunt resistances of silicon solar cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 91, pp. 137-142, 2007.
- [31] K. Boudizi, M. Chegaar and A. Bouhemadou, "Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 91, pp. 1647-1651, 2007.
- [32] P. Merhej, "Solar cells modellization and power management in photovoltaic generation systems," *Universita 'Degli Studi Di Pavia, Facolta 'Di Ingegneria*, 2010.
- [33] F. Adamo, F. Attivissimo, A. Di Nisio, A. Lanzolla and M. Spadavecchia, "Parameters estimation for a model of photovoltaic panels," *19th IMECO WCFAM*, 2009.
- [34] J. Charles, "A practical method of analysis of the current-voltage characteristics of solar cells," *Solar Cells*, 4, pp. 169-178, 1981.
- [35] M. Benghanem and S. Alamri, "Modeling of photovoltaic module and experimental determination of serial resistance," *Journal of Taibah University for Science*, 2008.
- [36] M. de Blas, J. Torres, E. Prieto and A. García, "Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices," *Renewable Energy*, 25, pp. 371-380, 2002.
- [37] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons, 2002.
- [38] J. Phang, D. Chan and J. Phillips, "Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameter," *12 EUPVSEC*, pp. 176-179, 1994.
- [39] D. Chan, J. Phillips and J. Phang, "A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters," *Solid State Electronics*, 29, pp. 329-337, 1986.
- [40] J. Wang, J. Shieh, Y. Su, K. Kuo, Y. Chang, Y. Liang, J. Chou, K. Liao and J. Jiang, "A novel method for the determination of dynamic resistance for photovoltaic modules," *Energy*, 36, pp. 5968-5974, 2011.

- [41] A. Bühler and A. Krenzing, "Method for photovoltaic parameter extraction according to a modified double-diode model," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21, pp. 884-893, 2013.
- [42] E. Radziemska, "Dark I-V-T measurements of single crystalline silicon solar cells," *Energy Conversion and Management*, 46, pp. 1485-1494, 2005.
- [43] K. Ishaque, Z. Salam and Syafarudding, "A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model," *Solar Energy*, 85, pp. 2217-2227, 2011.
- [44] L. De Bernardez and R. H. Buitrago, "Dark I-V curve measurement of single cells in a photovoltaic module," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 14, pp. 321-327, 2006.
- [45] L. De Bernardez, R. Buitrago, M. Battioni, M. Cutrera and G. Risso, "Estudio de la curva I-V de celdas individuales en paneles fotovoltaicos," *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9.
- [46] M. C. Alonso-García, J. Ruiz and W. Herrmann, "Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays," *Renewable Energy*, 31, pp. 1986-1993, 2006.
- [47] V. d'Alessandro, P. Guerriero, S. Daliento and M. Gargiulo, "A straight forward method to extract the shunt resistance of photovoltaic cells from current-voltage characteristics of mounted arrays," *Solid State Electronics*, 63, pp. 130-136, 2011.
- [48] G. Alers, J. Zhou, C. Deline, P. Hacke and S. Kurtz, "Degradation of individual cells in a module measured with differential IV analysis," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19, pp. 977-982, 2011.
- [49] M. C. Alonso-García and J. Ruiz, "Analysis and modeling the reverse characteristics of photovoltaic cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90, pp. 1105-1120, 2006.
- [50] D. King, B. Hansen, J. Kratochvil and M. Quintana, "Dark current-voltage measurements on photovoltaic module as a diagnostic or Manufacturing tool," *26th IEEE PSC*, 1997.
- [51] J. Thongpron, K. Kirtikara and C. Jivacate, "A method for the determination of dynamic resistance of photovoltaic modules under illumination," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90, pp. 3078-3084, 2006.
- [52] A. Mermoud and T. Lejeune, "Performance assessment of a simulation model for pv modules of any available technology," *EUPVSEC 25th*, 2010.
- [53] J. Eikelboom and A. Reinders, "Determination of the irradiation dependent efficiency of multicrystalline Si pv modules on basis of IV curve fitting and its influence on the Annual Performance," *Netherlands Energy Research Foundation ECN*, 45, 1997.

- [54] A. L. Fahrenbruch and R. Bube, *Fundamentals of Solar Cells. Photovoltaic Solar Energy Conversion*, New York: Academic Press, 1983.
- [55] V. V. Brus, M. I. Ilashchuk, Z. D. Kovalyuk and P. D. Maryanchuk, "Light-dependent I-V characteristics of TiO₂/CdTe heterjunction solar cells," *Semiconductor Science and Technology* 27, 2012.
- [56] V. V. Brus, "On quantum efficiency of nonideal solar cells," *Solar Energy* 86, pp. 786-791, 2012.
- [57] "PVsyst 5.66," *University of Geneva*.
- [58] I. S. IEC, *IEC 60904-9 : Photovoltaic devices. Solar simulator performance requirements*, 2007.
- [59] J. L. Balenzategui, J. Cuenca, I. Rodriguez-Outón and F. Chenlo, "Intercomparison and validation of solar cell I-V characteristic measurement procedures," *EUPVSEC 27th*, 2012.
- [60] J. L. Balenzategui, I. Rodriguez-Outón and F. Chenlo, "Calibration of crystalline silicon solar cells as reference devices for cells testers and sorters," *EUPVSEC 25th*, 2010.
- [61] J. L. Balenzategui, E. Forniés and M. C. Alonso-García, "To be published".
- [62] Y. Augarten, T. Trupke, M. Lenio, J. Bauer, W. Juergen, M. Juhl, M. Kasemann and O. Breitenstein, "Calculation of quantitative shunt values using photoluminescence imaging," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21, pp. 933-941, 2013.
- [63] J. Hyvarinen and J. Karila, "New analysis method for crystalline silicon cells," *Proc. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2, pp. 1521-1524, 2003.
- [64] M. C. Alonso-García, J. Ruiz and F. Chenlo, "Experimental study of mismatch and shading effects in the I-V characteristic of a photovoltaic module," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, pp. 329-340, 2006.
- [65] W. Herrmann, "Analysis of array losses caused by electrical mismatch of PV modules," *20th EUPVSEC*, 2005.
- [66] V. Di Dio, D. La Cascia, R. Miceli and C. Rando, "A Mathematical Model to Determine the Electrical Energy Production in Photovoltaic Fields Under Mismatch Effect," *Clean Energy Power International Conference*, 2009.
- [67] W. Damm, D. Heinemann and D. Pukrop, "Power losses in PV arrays due to variations in the I-V characteristics of PV modules," *ISES Solar World Congress*, 1995.
- [68] C. Chamberlin, P. Lehman, J. Zoellick and G. Pauletto, "Effects of mismatch losses in photovoltaic arrays," *Solar Energy*, 54, pp. 165-171, 1995.

- [69] A. Massi Pavan, D. Mellit, A. De Pieri and V. Lughi, "A study on the mismatch effect due to the use of different photovoltaic modules classes in large-scale solar parks," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2012.
- [70] R. Zilles and E. Lorenzo, "Statistical analysis of current voltage characteristics of PV modules," *International Journal of Solar Energy*, 9, p. 233-239, 1999.
- [71] D. Picault, B. Raison, S. Bacha, J. Aguilera and J. De La Casa, "Changing interconnections to reduce mismatch losses: a case study," *EEEIC*, 2010.
- [72] H. Saha and G. Bhattacharya, "Maximum power point tracking of partially shaded solar photovoltaic arrays," *Solar Cells*, 25, pp. 143-153, 1988.
- [73] F. Martinez-Moreno, J. Muñoz and E. Lorenzo, "Experimental model to estimate shading losses on PV arrays," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94, pp. 2298-2303, 2010.
- [74] K. Wilson, D. De Ceuster and R. Sinton, "Measuring the effect of cell mismatch on module output," *IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 1, pp. 916-919, 2006.
- [75] L. Bucciarelli Jr, "Power loss in photovoltaic arrays due to mismatch in cell characteristics," *Solar Energy*, 23, pp. 277-288, 1979.
- [76] N. Kaushika and A. Rai, "An investigation of mismatch losses in solar photovoltaic cell networks," *Energy*, 32, pp. 755-759, 2007.
- [77] R. Janoch, "Analysis of solar cell mismatch losses at standard and non-standard conditions," *17th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1984.
- [78] T. Lambariski, D. Kadlec and C. Rogers, "Effects of cells sorting and module matching on array output," *15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1981.
- [79] J. W. Bishop, "Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits," *Solar Cells*, 25, pp. 73-89, 1988.
- [80] A. Chouder and S. Silvestre, "Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis," *Energy Conversion and Management* 51, pp. 1929-1937, 2010.
- [81] D. Roche, H. Outhred and R. John Kaye, "Analysis and Control of Mismatch Power Loss in Photovoltaic Arrays," *Progress in Photovoltaics: Research & Application*, 3, pp. 115-127, 1995.
- [82] S. Silvestre, A. Boronat and A. Chouder, "Study of bypass diodes configuration on PV modules," *Applied Energy*, 86, pp. 1632-1640, 2009.

- [83] E. Karatepe, M. Boztepe and M. Çolak, "Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells," *Solar Energy*, 81, pp. 977-992, 2007.
- [84] S. Guo, J. P. Singh, I. M. Peters, A. G. Aberle and T. M. Walsh, "A quantitative analysis of photovoltaic modules using halved cells," *International Journal of Photoenergy*, 2013.
- [85] S. M. Dasari, P. Srivastav, R. Shaw, S. Saravanan and P. Suratkar, "Optimization of cell to module conversion loss by reducing the resistive losses," *Renewable Energy*, pp. 82-85, 2013.
- [86] D. Neuhaus, R. Mehnert, G. Erfurt, M. Eberspächer, C. Hofbauer, M. Wolf, P. Magnucz, R. Lüdemann and A. Kubin, "Loss analysis of solar modules by comparison of IV measurements and prediction from IV curves of individual solar cells," in *20th EUPVSEC*, Barcelona, 2005.
- [87] S. Roberts, K. C. Heasman and T. M. Bruton, "The reduction of module power losses by optimisation of the tabbin ribbon," in *16th EUPVSEC*, Glasgow, 2000.
- [88] A. Luque, *Solar cells and optics for photovoltaic concentration (chapter 4)*, Adam Hilger, Bristol, 1989.
- [89] S. Krauter and R. Hanitsch, "Actual optical and thermal performance of PV modules," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 41, pp. 557-574, 1996.
- [90] Y. S. Khoo, T. M. Walsh, F. Lu and A. G. Aberle, "Method for quantifying optical parasitic absorptance loss of glass and encapsulant materials of silicon wafer based photovoltaic modules," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 102, pp. 153-158, 2012.
- [91] M. A. Green, *Silicon solar cells advanced principles and practice*, Centre for Photovoltaic Devices and Systems UNSW, 1995.
- [92] H. W. Lilliefors, "On the Kolmogorov-Smirnov Test for normality with mean and variance unknown," *Journal of the American Statistical Association*, 62, pp. 399-402, 1967.
- [93] P. Campbell, "Light trapping in textured solar-cells," *Solar Energy Materials*, 21, pp. 165-172, 1990.
- [94] P. Campbell, "Enhancement of light-absorption from randomizing and geometric textures," *Journal of the Optical Society of America B*, pp. 369-375, 1993.
- [95] P. Campbell and M. Green, "High performance light trapping textures for monocrystalline silicon solar cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 65, pp. 369-375, 2001.
- [96] V. Yerokhov, R. Hezel, M. Lipinski, R. Ciach, H. Nagel, A. Mylynych and P. Panek, "Cost-effective methods of texturing for silicon solar cells," *Solar Energy Materials & Solar*

Cells, 72, pp. 291-298, 2002.

- [97] J. Hylton, A. Burgers and W. Sinke, "Light trapping in alkaline texture etched crystalline silicon wafers," *EUPVSEC 16th*, pp. 1434-1437, 2000.
- [98] J. Müller, A. Metz and R. Hezel, "A new and simple approach for fabricating inverted pyramids on crystalline silicon solar cells," *EUPVSEC 17th*, 2001.
- [99] B. Sopori, "Reflection characteristics of textured polycrystalline silicon substrates for solar cells," *Solar Cells*, 25, pp. 15-26, 1988.
- [100] K. Holdermann, "Method for the wet chemical pyramidal texture etching of silicon surfaces". USA Patent 6451218, 2002.
- [101] W. Bailey, M. Coleman, C. Harris and I. Lesk, "Texture etching of silicon: method, USA Patent 4137123, 1979." . USA Patent 4137123, 1979.
- [102] P. Singh, R. Kumar, M. Lal, S. Singh and B. Das, "Effectiveness of anisotropic etching of silicon in aqueous alkaline solutions," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 70, pp. 103-113, 2001.
- [103] Z. Xi, D. Yang and D. Que, "Texturization of monocrystalline silicon with tribasic sodium phosphate," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 77, pp. 255-263, 2003.
- [104] U. Gangopadhyay, K. H. Kim, H. Dhungel k, U. Manna, K. Basu P, M. Banerjee, H. Saha and Y. Junsin, "A novel low cost texturization method for large area commercial mono-crystalline silicon solar cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, no. 90, pp. 3557-3567, 2006.
- [105] Y. Nishimoto and K. Namba, "Investigation of texturization for crystalline silicon solar cells with sodium carbonate solutions," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 61, pp. 393-402, 2002.
- [106] Y. Schröder, E. Obermeier and A. Steckenborn, "Micropyramidal hillocks on KOH etched {100} silicon surfaces: formation prevention and removal," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 9, pp. 139-145, 1999.
- [107] O. Powerl and H. Harrison, "Anisotropic etching of {1 0 0} and {1 1 0} planes in (1 0 0) silicon," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 11, pp. 217-220, 2001.
- [108] S. Tan, M. Reed, H. Han and R. Boudreau, "Morphology of etch hillock defects created during anisotropic etching of silicon," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 4, pp. 147-155, 1994.
- [109] G. E. McGuire, *Semiconductor Materials and Process Technology for VLSI and ULSI*, William Andrew Inc, 1989.

- [110] S. C. Baker-Finch and K. R. McIntosh, "Reflection distributions of textured monocrystalline silicon: implications for silicon solar cells," *Progress in photovoltaics: Research and Applications*, 21, pp. 960-971, 2012.
- [111] S. Campbell, K. Cooper, L. Dixon, R. Earwaker, S. Port and D. Schiffrin, "Inhibition of pyramid formation in the etching of Si p/1 00S in aqueous potassium hydroxide isopropanol," *Journal of Micromechanics an Microengineering*, 5, pp. 209-218, 1995.
- [112] G. Kuchler and R. Brendel, "Reconstruction of the surface topography of randomly textured silicon," *Progress in Photovoltaics: Research and Application*, 11, pp. 89-95, 2003.
- [113] A. Parretta, E. Bobeico, L. Lancelotti, P. Morvillo, A. Wang and J. Zhao, "A new approach to the analysis of light collected by textured silicon surfaces," *World Conference in Photovoltaics Energy Conversion*, 2003.
- [114] A. Parretta, A. Sarno, P. Tortora, H. Yakubu, P. Maddalena, J. Zhao and A. Wang, "Angle-dependent reflectance measurements on photovoltaic materials and solar cells," *Optics Communications*, 172, pp. 139-151, 1999.
- [115] B. Sopori, "Optical diffraction technique for determination of crystal orientations," *Applied Optics*, 20, pp. 1758-1763, 1981.
- [116] B. Sopori, "The principle of dislocation analysis by coherent optical scattering from a defect-etched surface," *Journal of Electrochemical Society*, 135, pp. 2601-2606, 1988.
- [117] B. Sopori, "Use of optical scattering to characterize dislocations in semiconductors," *Applied Optics*, 27, pp. 4676-4683, 1988.
- [118] B. Sopori, C. Wei, Z. Yi and J. Madjpour, "High-speed mapping of grown-in defects and their influence in large-area silicon photovoltaic devices," *Journal of Crystal Growth*, 210, pp. 346-350, 2000.
- [119] B. Sopori, Y. Zhang, R. Faison and J. Madjpour, "Principles and applications of reflectometry in PV manufacturing," *NCPV Program Riview*, 2001.
- [120] B. Sopori, C. Auriemma and J. Madjpour, "GT Reflectometer: Performance testing/Error Analysis," *12th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cell Materials and Processes*, 2002.
- [121] C. Zaldo, J. Albella and E. Forniés. España Patent PCT/ES2004/070050, Método óptico y dispositivo para la cuantificación de la textura en células fotovoltaicas.
- [122] E. Forniés, C. Zaldo and J. M. Albella, "Control of random texture of monocrystalline silicon cells by angle-resolved optical reflectance," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 87, pp. 583-593, 2005.

- [123] M. A. Green, "Analytical expression for spectral composition of band photoluminescence from silicon wafers and bricks," *Applied Physics Letters*, 99, 2011.
- [124] M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics," *Pergamon Press, Oxford*, 1980.
- [125] C. Zaldo, J. M. Albella and F. E., "Optical method and device for texture quantification of photovoltaic cells". United States Patent US20060268283 A1, 30 Nov 2006.
- [126] D. M. Cambre, *Proyecto Fin de Carrera "Sistema optoelectrónico de medida de la textura aleatoria en obleas de silicio monocristalino, con software de control en WIN32 y MATLAB"*, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2007.
- [127] H. Mäckel, D. M. Cambre, C. Zaldo, J. M. Albella, S. Sánchez, C. Vázquez, I. Sánchez and M. A. Vázquez, "Charazterization of monocrystalline silicon texture using optical reflectance patterns," in *EUPVSEC*, Valencia, 2008.